



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS - UFG
FACULDADE DE ADMINISTRAÇÃO, CIÊNCIAS CONTÁBEIS E
CIÊNCIAS ECONÔMICAS – FACE/UFG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA

JESSICA DE ABREU BARBOSA

**IMPACTOS DAS QUEIMADAS E POLÍTICAS AMBIENTAIS:
UMA ANÁLISE UTILIZANDO JOGOS AGREGATIVOS**

GOIÂNIA

2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
FACULDADE DE ADMINISTRAÇÃO, CIÊNCIAS CONTÁBEIS E CIÊNCIAS ECONÔMICAS

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

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

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

1. Identificação do material bibliográfico

☒ Dissertação ☐ Tese

2. Nome completo do autor

Jessica de Abreu Barbosa

3. Título do trabalho

Impactos das Queimadas e Políticas Ambientais: uma análise utilizando jogos agregativos

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

Concorda com a liberação total do documento ☒ SIM ☐ NÃO¹

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

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

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

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

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

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



Documento assinado eletronicamente por **Wilfredo Fernando Leiva Maldonado, Usuário Externo**, em 09/04/2021, às 21:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **JESSICA DE ABREU BARBOSA, Discente**, em 10/04/2021, às 10:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1941211** e o código CRC **91DEB30B**.

Referência: Processo nº 23070.009703/2021-16

SEI nº 1941211

JESSICA DE ABREU BARBOSA

**IMPACTOS DAS QUEIMADAS E POLÍTICAS AMBIENTAIS:
UMA ANÁLISE UTILIZANDO JOGOS AGREGATIVOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia da Faculdade de Administração, Ciências Contábeis e Ciências Econômicas da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Economia.

Área de concentração: Economia Aplicada.

Orientador: Professor Doutor Wilfredo Fernando Leiva Maldonado.

GOIÂNIA

2021

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

Barbosa, Jessica de Abreu

Impactos das queimadas e políticas ambientais [manuscrito] : Uma
análise utilizando jogos agregativos / Jessica de Abreu Barbosa. -
2021.

vii, 59 f.

Orientador: Prof. Dr. Wilfredo Fernando Leiva Maldonado.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás,
Faculdade de Administração, Ciências Contábeis e Ciências
Econômicas (FACE), Programa de Pós-Graduação em Economia, Goiânia,
2021.

Bibliografia. Apêndice.

Inclui gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Desmatamento. 2. Queimadas. 3. Produção agropecuária. 4.
Políticas Ambientais. 5. Jogos Agregativos. I. Maldonado, Wilfredo
Fernando Leiva, orient. II. Título.

CDU 33



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

FACULDADE DE ADMINISTRAÇÃO, CIÊNCIAS CONTÁBEIS E CIÊNCIAS ECONÔMICAS

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 9 da sessão de Defesa de Dissertação de Jessica de Abreu Barbosa, que confere o título de Mestra em Economia, na área de concentração em Economia Aplicada.

Aos doze dias do mês de março do ano de dois mil e vinte e um, a partir das 19 horas e 30 minutos, por meio de videoconferência, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada "Impactos das Queimadas e Políticas Ambientais: uma análise utilizando jogos agregativos". Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor Wilfredo Fernando Leiva Maldonado (USP), com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor Francisco Bruno de Lima Holanda (PPGECON/UFG), membro titular interno e Professora Doutora Jussara Ribeiro (Presidência da República), membro titular externo. Durante a arguição os membros da banca não fizeram sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido a candidata aprovada pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor Wilfredo Fernando Leiva Maldonado, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos doze dias do mês de março do ano de dois mil e vinte e um.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

Documento assinado eletronicamente por **Francisco Bruno De Lima Holanda, Professor do Magistério Superior**, em 12/03/2021, às 20:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jussara Ribeiro, Usuário Externo**, em 12/03/2021, às 21:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Wilfredo Fernando Leiva Maldonado, Usuário Externo**, em 12/03/2021, às 21:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1892222** e o código CRC **8AB59BE8**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço as todas as pessoas que me acompanharam na trajetória do mestrado, em especial minha mãe, Maria Ivonete, que sempre me apoia nos meus projetos e garante que eu nunca desista. Ao meu irmão, Guilherme, por me encorajar todos os dias. Ao meu namorado, Rennan, por me ajudar a refletir, instigando o meu raciocínio e me ajudando a adquirir novos conhecimentos, estando comigo em todos os momentos. Aos colegas que conheci no curso e os amigos que fiz em Goiânia, compartilhando experiências e ideias, dando um sentido especial ao curso. Agradeço também aos professores da UnB que na graduação, me ajudaram e me incentivaram a escolher o programa de mestrado da UFG, Joanelio Rodolpho Teixeira e Rodrigo Andrés de Souza Peñaloza.

Agradeço aos funcionários da secretaria por estarem sempre disponíveis para atender as demandas dos alunos com respeito e eficácia. Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), que fomentou a pesquisa, e que com seu apoio tornou possível a mudança de Brasília para Goiânia para o acompanhamento do curso.

Por fim, agradeço a todos os professores, em especial ao meu orientador, Wilfredo Fernando Leiva Maldonado, pela dedicação, exigência e inspiração e, principalmente, por toda a ajuda oferecida para a conclusão do projeto; e ao Professor Waldemiro de Alcântara Neto por todo apoio ofertado, estando sempre disponível para atender e ajudar.

RESUMO

As queimadas e o desmatamento são problemas relevantes que afetam o meio ambiente e o crescimento econômico de um país. O modo como os governos lidam com os impactos e externalidades causados pelo uso do fogo e pela perda de florestas pode acarretar consequências que afetam a imagem do país no exterior, ocasionando um ambiente de incerteza, prejudicando decisões de investimento, além de afetar a saúde das pessoas, a qualidade do ar, da água, com efeitos na própria produção. Utilizando a estrutura de jogos agregativos, desenvolvemos um modelo que permite encontrar o equilíbrio nas decisões de queimar e desmatar dos produtores e, a partir dele, analisamos o efeito da implementação de uma multa como custo para verificar como o equilíbrio é afetado. No equilíbrio de Nash, as multas afetam negativamente as decisões ótimas dos fazendeiros. Para verificar empiricamente os resultados, regredimos os dados em *Cross-section* dos municípios da Amazônia Legal para o ano de 2017 e os dados em Painel para os Estados da Amazônia Legal no período de 2009 a 2018. Os resultados encontrados apontam que as multas têm uma relação negativa com o desmatamento ao longo do tempo, mas que fatores como uma fiscalização precária prejudicam a implementação da política de autuação, fazendo com esta não seja tão eficiente quanto o que foi verificado teoricamente.

Palavras-chave: Desmatamento. Queimadas. Produção agropecuária. Políticas ambientais. Equilíbrio de Nash. Jogos Agregativos.

ABSTRACT

Burning and deforestation are relevant problems that affect the environment and the economic growth. The way in which governments deal with the impacts and externalities caused by fire and deforestation decisions can have consequences that affect the country's reputation abroad, causing an environment of uncertainty, affecting investment decisions, in addition to affecting the health of people, the air and water qualities, with consequences on the production itself. Using an aggregative game framework, we provide a model that allows us to find the equilibrium in the producers' burning and deforesting decisions. The equilibrium also allows us to analyze the effect of fines over those decisions seen as costs of the producers. In the Nash equilibrium, fines negatively affect farmers' optimal decisions. To empirically verify the results, we run a Cross-section data regression model using information of the municipalities of the Legal Amazon for the year 2017 and a Panel data regression for the States of the Legal Amazon from 2009 to 2018. The results found indicate that the fines have a negative impact on the deforestation over time, but factors such as poor oversight enforcement hamper the implementation of the assessment policy, making it not as efficient as what previewed in the theoretical model.

Keywords: Deforestation. Fires. Agricultural production. Environmental policies. Nash equilibrium. Aggregative Games.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esboço do gráfico da equação $\left(\frac{A}{A_0}\right)^r + \left(\frac{D}{T}\right)^r = 1$	22
Figura 2: Gráfico ilustrando $f(\widetilde{\alpha}_n(D)) = g(\widetilde{\alpha}_n(D))$	26
Figura 3: Gráfico do custo (K) em função do desmatamento (D).....	28
Figura 4: Gráfico do custo (k) em função do número de fazendeiros (N).....	31
Figura 5: Taxa de desmatamento (em Km ²) na Amazônia Legal de 2009 a 2018.....	35
Figura 6: Focos de queimadas na Amazônia Legal de 2009 a 2018.....	36
Figura 7: Focos de queimada por tipo de propriedade rural do CAR na Amazônia.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição das variáveis do modelo <i>Cross-section</i>	38
Tabela 2 – Estatísticas descritivas das variáveis do modelo <i>Cross-section</i>	39
Tabela 3 – Estatísticas descritivas do log das variáveis do modelo <i>Cross-section</i>	39
Tabela 4 – Teste de Shapiro-Wilk para a normalidade dos dados <i>Cross-section</i>	40
Tabela 5 – Matriz de correlação do desmatamento e das queimadas (1).....	40
Tabela 6 – Matriz de correlação do desmatamento e variáveis explicativas (1).....	40
Tabela 7 – Regressão entre desmatamento e focos de queimadas (1).....	41
Tabela 8 – ANOVA do desmatamento e das queimadas.....	41
Tabela 9 – Teste de Skewness/Kurtosis do desmatamento e das queimadas (1).....	42
Tabela 10 – Regressão entre o desmatamento e as variáveis explicativas (1).....	43
Tabela 11 – ANOVA do desmatamento e variáveis explicativas.....	43
Tabela 12 – Teste de Skewness/Kurtosis do desmatamento e variáveis explicativas (1).....	43
Tabela 13 – Descrição das variáveis do modelo do Painel.....	45
Tabela 14 – Estatísticas descritivas das variáveis em Painel.....	45
Tabela 15 – Estatísticas descritivas dos logaritmos em Painel.....	46
Tabela 16 – Matriz de correlação para o desmatamento e as queimadas (2).....	46
Tabela 17 – Matriz de correlação do desmatamento e variáveis explicativas (2).....	47
Tabela 18 – Regressão do desmatamento e das queimadas (2).....	47
Tabela 19 – Teste de Skewness/Kurtosis para o desmatamento e as queimadas (2).....	48
Tabela 20 – Teste de Breush-Pagan para o desmatamento e as queimadas.....	48
Tabela 21 - Regressão entre desmatamento e as variáveis explicativas (2).....	49
Tabela 22 – Teste de Skewness/Kurtosis para o desmatamento e as variáveis.....	50
Tabela 23 – Teste de Breush-Pagan para o desmatamento e as variáveis explicativas (2).....	50
Tabela 24 – Especificação do modelo.....	50

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
2. Desmatamento, queimadas e políticas ambientais.....	3
2.1 Impactos ambientais das mudanças climáticas, do desmatamento e das queimadas.....	4
2.2. A agricultura de corte e queima.....	8
2.3. Desmatamento e pecuária.....	10
2.4. Custos.....	11
2.5. Políticas ambientais e outras intervenções.....	12
3. Modelo de jogo agregativo para a análise da externalidade do desmatamento por queimadas e cálculo de equilíbrio de Nash.....	18
3.1. Jogos agregativos.....	18
3.2. A tragédia dos comuns e o modelo.....	19
3.3. Caso Geral	20
3.4. Existência de Equilíbrio Interior.....	24
3.4.1. Caso I.....	26
3.4.2. Caso II.....	28
3.4.3. Caso III.....	31
4. Análise empírica.....	35
4.1. <i>Cross-section</i> dos municípios da Amazônia Legal.....	37
4.2. Resultados e discussão do modelo com dados <i>Cross-section</i>	40
4.3. Dados em Painel para os estados da Amazônia Legal.....	44
4.4. Resultados e discussão do modelo com dados em Painel.....	47
5. Conclusão.....	51
6. Referências.....	53
APÊNDICE A.....	57
APÊNDICE B.....	58

1. Introdução

A preservação ambiental, as mudanças climáticas e o efeito que o desmatamento e as queimadas têm sobre essas variáveis estão em constante debate na literatura e na política. Em 2015, a Organização das Nações Unidas (ONU) anunciou os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e 169 metas que estimularão ações, ao longo dos anos, até 2030. Dentre esses objetivos está a conservação e a restauração do uso dos ecossistemas terrestres; desta forma, deter o aumento descontrolado do desmatamento e das queimadas é importante para mitigar o impacto das mudanças climáticas.

No Brasil, a agropecuária é uma das principais atividades econômicas desenvolvidas, com produção de soja, cana-de-açúcar, suco de laranja, carne bovina, entre outros. Dados do Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (Cepea-Esalq/USP) em parceria com a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA), atestam que a soma de bens e serviços em 2019 que tiveram como fonte o agronegócio chegou a 21,4% do PIB brasileiro, ou R\$ 1,55 trilhão. Conforme cálculo do Cepea-Esalq/USP, o Produto Interno Bruto (PIB) do agronegócio brasileiro cresceu 3,3% no acumulado do primeiro trimestre de 2020.

Nesse contexto, o desmatamento tem sido uma prática comumente utilizada para a realização de atividades agropecuárias, assim como o uso do fogo para melhor manejo e melhora da fertilidade do solo em um período menor. Com a agricultura de corte e queima, por exemplo, limpa-se o terreno para que a atividade agrícola possa ser realizada. De janeiro a junho de 2020, já foram encontrados cerca de 23.143 focos de incêndio no Brasil, tendo o país alcançado a marca de mais de 10.000 quilômetros quadrados de área desmatada somente para o ano de 2019, segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

O aumento do desmatamento e do uso do fogo, que pode levar a essa perda florestal, prejudica o ecossistema e a qualidade do ar e da água, bem como a qualidade de vida das pessoas que moram na região desmatada. O desmatamento em conjunto com as queimadas representa perdas de bem-estar para os agricultores e para a população em geral. Além disso, o descaso com o meio-ambiente pode afastar investidores, criando um ambiente de incerteza, o que pode fazer com que haja uma queda na oferta de serviços financeiros. Em junho de 2020, sete dos maiores investidores europeus, que administram mais de \$2 trilhões de ativos, escreveram carta aberta para embaixadas brasileiras em oito países alegando desinvestimento no setor de produção pecuária, de comerciantes de grãos

e até de títulos do governo caso o Brasil não progredisse na questão ambiental, sobretudo no que tange à destruição da Floresta Amazônica. (REUTERS, 2020)

Para mitigar esses efeitos, os governos buscam soluções como criar códigos florestais, aplicação de multas, como também oferecem subsídios para melhora na tecnologia empregada. O objetivo principal deste trabalho é analisar as variáveis que estrategicamente definem o desmatamento, que inclui o ocasionado pelo uso do fogo, e encontrar os níveis de equilíbrio individualmente ótimos de queimadas, tal que haja produtividade da terra e ganhos na produção. Como consequência veremos os efeitos que aumentos ou diminuições de multas aplicadas contra a flora, assim como de outras variáveis do modelo, podem ter sobre o desmatamento.

Os jogos agregativos têm sido considerados para modelagens de situações nas quais os agentes são não-cooperativos, onde a decisão de cada agente é afetada por um efeito agregado de todos os agentes. Desenvolvemos um modelo que destaca o papel da terra como insumo na produção, tendo como objetivo específico encontrar e analisar o equilíbrio quando: i) a tecnologia é linear, ou seja, quando a terra tem rendimentos constantes de escala na produção; ii) quando a tecnologia é não linear e os custos marginais dos fazendeiros são iguais; e iii) o caso no qual a tecnologia é não linear e as fazendas são heterogêneas.

Como objetivo específico também investigamos o impacto de variáveis no desmatamento por queimadas, tais como: a quantidade de fazendeiros, o custo envolvido na produção, custo este que envolve eventuais multas contra a flora e a quantidade de atividade agrícola. Para isso, analisamos 90 municípios da Amazônia Legal em 2017, como também os estados da Amazônia Legal para o período de 2009 a 2018, para captar os efeitos intertemporais das variáveis no modelo.

Este estudo foi dividido em 5 seções. Na primeira seção temos a introdução; na segunda seção discutimos as principais variáveis que concernem o desmatamento e as queimadas, além das políticas ambientais implementadas; na terceira seção desenvolvemos um modelo de jogo agregativo para encontrar o equilíbrio do jogo dos fazendeiros; na quarta seção apresentamos a parte empírica do estudo e na quinta seção concluímos.

2. Desmatamento, queimadas e políticas ambientais

Desde que a mudança climática entrou na arena da política internacional há duas décadas, o foco principal está na mitigação dos danos causados ao meio-ambiente, com a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima e todos os documentos subsequentes pedindo repetidamente aos países que cooperem na redução das emissões de gases de efeito estufa. Lidar com as mudanças climáticas apresenta às nações um dilema em uma escala sem precedentes. (HASSON ET AL, 2010)

Além das mudanças climáticas, o desmatamento aliado às queimadas representa um fator negativo à preservação dos ecossistemas. Podemos dizer que as queimadas têm causas naturais e antropogênicas. O uso do fogo para controlar pastagens é uma prática usada por muitos povos seja para melhorar o uso do solo, abrir pastagens, preparar o terreno para a agricultura e a pecuária. Entretanto, as queimadas e o desmatamento são responsáveis por externalidades negativas que prejudicam o meio-ambiente e têm impactos negativos na qualidade da água, do ar e na saúde das pessoas, o que pode afetar a economia e a produção de um país, chegando a ter impactos negativos a nível global.

Um *trade-off* entre o desenvolvimento econômico e a conservação ambiental às vezes é observado. As atividades agrícolas em expansão nos países em desenvolvimento contribuem para o aumento da produção de *commodities*, mas causam também degradação ambiental. Para reduzir os impactos negativos dessas atividades, os governos monitoram as atividades econômicas, aplicando regulamentações para preservar a qualidade no meio-ambiente, já que o sequestro de carbono e purificação da água por exemplo, são afetados por externalidades. (JUNG E POLASKY, 2018)

Na cadeia produtiva da indústria manufatureira, as emissões de carbono dos processos são os principais motivos da emissão de gases do efeito-estufa. Políticas de redução do carbono como limitações das emissões, tarifas de carbono, limites à comercialização e mecanismos de compensação têm sido analisadas na literatura. (CAMMELLI E ANGELSEN, 2019)

Neste capítulo revisamos a literatura que envolve o uso do fogo e o desmatamento em geral, que tem as queimadas como umas das causas relevantes, além das estratégias e políticas ambientais utilizadas para mitigar os efeitos negativos ao meio-ambiente.

2.1. Impactos ambientais das mudanças climáticas, do desmatamento e das queimadas

No início dos anos 90, conforme Andrée et al. (2019), havia uma preocupação em saber se o desenvolvimento econômico era prejudicial aos recursos naturais ou se o aumento na renda seria capaz de melhorar as condições ambientais. Estudos envolvendo a curva de Kuznets foram se tornando populares, mas a partir dos anos 2000 esse modelo passou a receber críticas devido à falta de dados estatísticos confiáveis. Com isso, vários estudos surgiram para investigar que fatores influenciam na preservação dos recursos naturais, propondo soluções para os problemas relacionados às condições ambientais.

Além do desenvolvimento econômico, os efeitos das mudanças demográficas no meio-ambiente também têm sido analisados. Andor et al. (2018) investigam a relação entre idade individual e as atitudes em relação às mudanças climáticas, políticas e preferências climáticas para gastos públicos. Para eles, nas próximas décadas, as mudanças demográficas alterarão drasticamente a estrutura da população mundial. O crescimento populacional nos países em desenvolvimento deve continuar, ao passo que a maioria dos países industrializados enfrentará um número decrescente de habitantes. Ao mesmo tempo, o mundo é confrontado com o problema desafiador das mudanças climáticas, que é induzido pelo aumento das emissões de gases de efeito estufa. Para obter apoio suficiente para a adoção de tais políticas, os formuladores de políticas enfrentam sérios obstáculos. Os custos dessas medidas são conhecidos e aumentam no presente, enquanto os benefícios são incertos e devem surgir em um futuro distante.

Nesse contexto, os resultados de Andor et al. (2018) indicam que as sociedades envelhecidas reduziram seus gastos em políticas que geram benefícios apenas em um futuro distante. Em uma sociedade em envelhecimento, a parcela cada vez maior de idosos no eleitorado aumenta a idade do eleitor mediano que, de acordo com o raciocínio teórico da economia política, determina a quantidade de provisão de bem público. Os resultados demonstram que os idosos mostram menos preocupação com a redução das mudanças climáticas, enquanto estão mais preocupados com outros desafios que o mundo enfrenta. Além disso, é menos provável que as pessoas idosas apoiem políticas favoráveis ao clima, como o subsídio a fontes renováveis, aloquem menos recursos públicos e tenham menor disposição a pagar por políticas ambientais. Em suma, as mudanças demográficas ocorrendo em muitos países industrializados podem ser uma barreira para maiores recursos públicos para políticas de proteção climática no futuro.

Com os efeitos das mudanças climáticas está também inserido o problema do aumento da emissão de carbono, que pode ser causado tanto por essas mudanças no clima, quanto pela ação humana. Lu et al. (2020) utiliza um jogo de Stackelberg para avaliar as decisões de investimento do comprador e do vendedor quando existe um acordo de co-investimento em tecnologia de redução da emissão de carbono. Eles provaram que a solução ótima para o comprador existe e é única e desenvolve vários modelos que identificam o equilíbrio entre o comprador e o vendedor. Uma maior proporção de investimentos nas tecnologias para a redução das emissões de carbono indicou um aumento do investimento financeiro para atingir os objetivos de redução das emissões de carbono. Uma demanda de mercado elevada também aumenta as emissões de carbono dos dois jogadores. Aumentos no preço de venda de carbono e no preço de compensação de carbono inibem as emissões para compradores e fornecedores. Contudo, os preços diferem porque há uma perda de lucros para todos os jogadores devido ao aumento nos preços de compensação.

As atividades relacionadas ao desmatamento também contribuem para a emissão de gases do efeito estufa. Para Combes et al. (2015), as atividades de desmatamento têm efeitos negativos sobre o meio ambiente. As florestas, por exemplo, são o segundo maior estoque de carbono depois dos oceanos, portanto contribuindo para mitigar as mudanças climáticas. Vários estudos, segundo os autores, focalizaram o papel de fatores macroeconômicos no processo de desmatamento, após as reformas econômicas implementadas nos programas de ajuste estrutural nos anos 90. Entretanto, a maioria dos países cobertos por florestas naturais são países em desenvolvimento, com capacidade limitada de cobrar impostos e de restringir o acesso aos mercados internacionais de crédito.

Para Morello et al. (2020), a extração de madeira e o uso do fogo na agricultura representa um rompante comparável ao desmatamento. O fogo que se espalha acidentalmente devido a atividades agropecuárias ameaça a fauna, a flora e pode liberar uma quantidade de carbono que as florestas não são capazes de sequestrar. Eles afirmam que para mitigar os impactos causados pelas queimadas, que têm como principais motivos a ação humana, as mudanças climáticas e a degradação ambiental aliada ao uso prévio do fogo, os governos federal e local têm implementado políticas para a prevenção e supressão das queimadas nas florestas. Algumas políticas incluem a proibição do uso parcial ou total do fogo na agricultura, subsídio para uso de técnicas alternativas e educação ambiental.

Os incêndios florestais geram consequências que merecem atenção, principalmente no caso de ecossistemas que têm grande valor. Molina et al. (2019) sugerem uma abordagem que identifica os efeitos dos incêndios na biomassa, em consonância com o estoque de carbono potencial das áreas utilizadas e o consumo dessa biomassa baseados no comportamento do fogo. Eles desenvolvem uma metodologia que acessa os impactos econômicos dos incêndios no estoque de carbono. O enfoque foi no custo de reduzir o estoque de carbono com base no custo de compensação demandado pelas companhias que investem na mitigação ao invés da quantificação monetárias de mudanças do bem-estar social. Contudo, o mercado de carbono é irregular e instável, dependendo da oferta e demanda internacionais. Os impactos econômicos do carbono seriam dessa maneira muito suscetíveis à volatilidade do mercado de CO₂.

Um dos problemas relacionados às queimadas, conforme o estudo de Cammelli e Angelsen (2019), é que, sem o devido controle, os incêndios também podem se espalhar para a propriedade dos campos e florestas vizinhos. Os danos causados por incêndios acidentais causam danos para as pessoas que os praticam. Com a falta de controle, os incêndios podem se espalhar para as propriedades e florestas vizinhas. Os autores chamaram esse risco de risco de incêndio na vizinhança ou *neighborhood fire hazard* (NFH). Na amostra utilizada por eles, 41% (n = 238) dos danos causados por incêndio foram causados por incêndios provocados por vizinhos. Foi atestado que os agricultores só tinham um incentivo para controlar os próprios incêndios se muitos vizinhos fizessem o mesmo.

Da mesma forma, as tecnologias livres de fogo (mas sensíveis ao fogo) eram pouco atraentes se o NFH fosse muito alto. Os incêndios reconhecidos pelos agricultores brasileiros como do tipo fogo de longe (incêndios que vêm de longe) são responsáveis por cerca da metade dos danos causados por incêndio relatados no estudo de Cammelli e Angelsen (2019). Os resultados indicaram um risco mais alto de seca reduz os incentivos para práticas agrícolas e controle de incêndios livres de fogo, porque aumenta a probabilidade de que a dispendiosa prevenção de incêndios seja um esforço desperdiçado. Além disso, o aumento do risco de seca em si também pode afetar o comportamento dos agentes, iniciando uma espiral de expectativas negativas que se realizam. Se o risco de seca aumentar com o tempo, mais agentes podem parar de controlar o fogo, o que, por sua vez, aumentaria o NFH atual.

Segundo Kumar (2015), um dos tipos de incêndios agrícolas comuns, que é praticado em diversos países como Índia e China, é a queima de resíduos de arroz. Esse

tipo de queima tem intensos resultados para a fazenda que adota essa prática e a vizinhança à qual faz parte. Em geral, há perda de nutrientes do solo, de matéria orgânica, impactos na produção, na produtividade, na qualidade do ar, perda de biodiversidade e de eficiência de água e energia, além de impactar na saúde humana e animal. Para Kumar (2015), na Índia, a poluição do ar resultante da queima de resíduos pode ser grave, tendo efeitos negativos na saúde, sendo a razão ou causando o agravamento de uma série de riscos à saúde, assim como pode causar acidentes devido à capacidade de visibilidade reduzida causada pela fumaça. A perda de matéria orgânica do solo é uma das ameaças mais decorrentes à sustentabilidade do sistema de cultivo de trigo e arroz que resultam da queima. A palha coletada nos campos tem importante valor econômico e serve à alimentação animal, como combustível e como matéria-prima para a indústria.

De acordo com Kumar et al. (2015), os poluentes liberados pela queima têm propriedades tóxicas e agentes cancerígenos potenciais. A liberação de dióxido de carbono na atmosfera, por sua vez, tem impactos negativos para a camada de oxigênio do ambiente, sendo um agravante do efeito estufa. Animais produtores de leite também são impactados pela queima, que além da diminuição da produção, há o risco de morte aumentado nesses animais, pois os altos níveis de CO₂ e CO no sangue pode alterar a hemoglobina, o que pode ser fatal para esses animais. Para as pessoas que sofrem de doenças respiratórias e cardiovasculares, os efeitos das queimadas também são adversos. Há a probabilidade de que gestantes e crianças pequenas sofram com a fumaça advinda da queima dos resíduos agrícolas. Ao inalar partículas finas, quadros de asma podem surgir e ataques brônquicos podem ser agravados. As doenças agravadas pela poluição do ar, além de aumentar as despesas médicas dos indivíduos, podem afetar também a sua produtividade no trabalho.

Pant (2015) desenvolveu um leilão reverso de preço uniforme e um sistema de pagamento real para incentivar a prevenção da queima de palha de arroz em campo aberto por pequenos agricultores do Nepal. Com isso, revelou os custos privados para os agricultores de evitar a queima de palha de arroz. Ele determinou um nível de pagamento em que os agricultores considerariam aceitável não se envolver na queima de resíduos. Os resultados revelaram que 86% dos agricultores tomaram a decisão de não queimar palha de arroz com um pagamento médio de US \$ 78,76 / ha de arrozal, o que representou US \$ 13,17 / tonelada de CO₂ de emissões. Com isso, Pant (2015) observou que a redução da queima agrícola poderia diminuir as emissões, mas associou custos privados aos agricultores. Como esses custos privados para os pequenos agricultores não são

comerciais e muitas vezes não observáveis, o leilão ajudou a revelar esses custos. Segundo Pant (2015), dependendo do grau de conhecimento dos agricultores sobre seus custos e benefícios, a queima se revelou o meio mais barato para descartar resíduos de arroz. Os agricultores geralmente ignoravam os custos ambientais das queimadas, pois são externalidades ou não são óbvias para eles. As principais externalidades são as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e carbono preto. Os agricultores não compreenderam claramente os custos privados da queima de resíduos, como custos de saúde e de perda de produtividade.

2.2. A agricultura de corte e queima

No contexto dos incêndios agrícolas, a agricultura de corte e queima é um tipo de atividade bastante empregada. Essa é uma técnica de baixo custo utilizada por fazendeiros para preparar a terra para o cultivo. De acordo com Júnior et al. (2008), pode ser caracterizada pelo uso contínuo de clareias abertas que permitem menor tempo de espera para o cultivo quando comparado ao pousio. Contudo, representa impactos negativos ao meio-ambiente. Em vários países, a agricultura de corte e queima é uma prática milenar, sendo utilizada pelas populações pobres rurais como meio de subsistência. Conforme Júnior et al. (2008), estudos que buscam compreender a dinâmica dos sistemas de subsistência que envolvem o uso do fogo, assim como os impactos ambientais e socioeconômicos dessas práticas, vem sendo desenvolvidos na literatura. Para eles, existem dois tipos de estudos mais comuns relacionados a esse tipo de prática. Enquanto uma parte desses estudos tem por objetivo analisar o caráter de destruição e de predação de recursos naturais, oferecendo alternativas de substituição, outra vertente busca comprovar que essa prática é sustentável, propondo ações que provem a manutenção dessa tradição agrícola.

Segundo Brady (1996), as clareiras abertas para a agricultura, à medida em que houve um aumento da população, permaneceram em terrenos cultivados ou em pastos. Na Europa e na América do Norte, onde a produção agrícola ultrapassou o crescimento da população, existem algumas áreas cultivadas que foram reflorestadas. No restante do mundo, as florestas permanecem sendo destruídas para permitir o uso da terra para o uso agrícola. A maior parte da produção de alimentos e grãos é comercializada nas vizinhanças, no país e no exterior. As vidas dos fazendeiros estão voltadas a práticas econômicas e não somente à própria subsistência. O corte e a queima, na região dos

trópicos, são destinados à produção agrícola, mas não para o uso contínuo das terras na agricultura. São abertas pequenas clareiras na região queimada e utilizam esse terreno para produzir. As cinzas obtidas como consequência dos incêndios fornecem nutrientes ao solo. Dessa maneira, as cinzas aumentam a quantidade de potássio, magnésio e cálcio disponível no solo, melhorando a qualidade nutricional, preparando a área para o cultivo, sendo esse sistema de plantio dependente da queima da biomassa acumulada durante a recuperação da floresta.

Goswami et al. (2011) analisaram os fatores que influenciam a adoção da agricultura de corte e queima no Nordeste da Índia, dado que uma parte considerável dessa região é destinada à agricultura itinerante. As variáveis utilizadas no estudo foram separadas de acordo com características sociais, econômicas, etárias, institucionais, físicas e pessoais com base na literatura sobre o comportamento dos fazendeiros. A idade e o nível educacional, a influência da percepção individual sobre a agricultura de corte e queima, fatores institucionais como o acesso ao crédito e a subsídios do governo, a renda, a presença de área cultivada, a natureza primária de ocupação, recursos disponíveis para o cultivo da terra e o declive do terreno foram escolhidos como importantes fatores que influenciam na adoção da agricultura de corte e queima.

Para Goswami et al. (2011), a probabilidade de adoção da agricultura de corte e queima diminui com o aumento da idade, sendo uma das possíveis causas o fato de pessoas mais velhas perceberem os impactos negativos na produtividade melhor do que os mais jovens. Dentre as pessoas que têm como ocupação principal o cultivo, a chance de escolher a queima é de 83% melhor do que aqueles que possuem outras profissões, dado que os produtores podem perceber melhor os impactos negativos devido a uma melhor experiência em atividades agrárias, escolhendo métodos alternativos. No estudo deles, a renda e o acesso ao crédito diminuem as chances da escolha por queimadas, o que pode ter como motivo a disponibilidade maior de recursos, que torna possível despesas adicionais por alternativas diferentes para limpar o terreno. Por outro lado, quanto maior a quantidade de terra destinada ao plantio, maior a chance de adotar o corte e a queima, sendo uma decisão que pode ser tomada para reduzir os custos da limpeza de uma maior porção de terra. Os resultados também mostraram que a probabilidade da escolha do corte e da queima aumenta quando os agricultores são favoráveis a essa prática, e quando esta é percebida como uma atitude comum entre as pessoas da região. As alterações na biodiversidade e na fertilidade do solo, embora causem danos sociais e

ecológicos, podem não mudar a percepção dos fazendeiros acerca desse tipo de técnica de maneira imediata.

2.3. Desmatamento e pecuária

Umas das componentes do desmatamento além das queimadas discutida na literatura são as atividades da pecuária. Mammadova et al. (2020) discute como práticas e interpretações de transparência específicas na cadeia de produção de couro no Brasil afetam a sustentabilidade, legitimidade e justiça nos resultados das políticas ambientais do Governo. O desmatamento associado com a pecuária na Amazônia se desenvolveu devido a processos econômicos e políticos ao longo da história. Eles mostram a importância do papel dos pecuaristas em situação legal em debates públicos, ao apresentar suas histórias como um discurso sobre meios de subsistência. Embora os pecuaristas sejam responsáveis por uma parte do desmatamento, eles fazem reivindicações de legitimidade e justiça ao enfatizar a posse da terra e uma injustiça histórica. A falta de investimento e uma política falha tornaria os atores vulneráveis, minaria a confiança no sistema e transferiria o problema para os fazendeiros ao invés de apresentar uma solução. Caberia aos mercados internacionais de couro encontrar mecanismos de transparência para que se alcance a meta de desmatamento zero na Amazônia.

Para Silva et al. (2020), ao analisar as causas dos incêndios de 2019, a ligação percebida entre o desmatamento e o uso da terra para a pecuária não é tão clara quanto se supõe. Ele defende que a preservação da terra por meio da intensificação da criação sustentável de gado pode atuar como um amortecedor entre a demanda e a oferta de gado e conseqüentemente o uso da terra e o desmatamento. A associação entre as queimadas e a criação de gado sabotaria o mercado pecuário minando o incentivo a investir nesse setor, levando a um uso contrafactual extensivo da terra e ao aumento da emissão de gases do efeito-estufa, já que a redução da demanda de mercado removeria os incentivos para a intensificação das pastagens e melhoria da produtividade animal, gerando um maior uso de novas terras.

Outro estudo que mostra a falta de clareza na relação entre o desmatamento e a pecuária é o de Müller-Hansen et al. (2019), que investigaram se a proposta para redução do desmatamento que inclui o aumento da criação de gado seria capaz de promover essa redução. Eles utilizam um modelo baseado no agente para estudar a interação entre o desmatamento e o aumento da pecuária na Amazônia Brasileira. O modelo desenhado

implica que somente os efeitos de preços, o acesso limitado ao crédito, os altos custos de investimentos e as falhas nas decisões impediriam o desmatamento total. A intensificação da pecuária teria efeitos redutores se a elasticidade-preço da demanda for alta e o mercado saturasse em algum período. Por outro lado, em condições de menor resposta dos preços, uma intensificação rápida da pecuária poderia levar a maiores taxas de desmatamento.

2.4. Custos

O desmatamento gera um custo social para a sociedade. Franklin Jr. e Pindyck (2018) exploram a transição florestal e propõem uma forma alternativa de cálculo do valor econômico de uma floresta tropical utilizando o método do custo médio ao invés do custo marginal para definir a política de uso de terra ótimo e os pagamentos dos serviços ecossistêmicos. O método foi aplicado no cálculo do custo social do desmatamento na Amazônia. Eles afirmam que a existência de um ponto de inflexão entre floresta e savana implica que a mudança da capacidade da floresta de retornar ao seu estado original após um dano afeta o valor econômico marginal da floresta preservada e deve ser considerada ao calcular o valor marginal. Quanto maior o desmatamento, menos resiliente será a floresta. O dano pode incluir eventos estocásticos como incêndios, enchentes e atividades humanas como desmatamento. Usualmente, quanto menor a cobertura florestal, menores serão os retornos das colheitas e maiores os custos com transportes. No artigo, quando os pontos de inflexão são considerados, o custo social do desmatamento pode ser bem maior do que os benefícios anteriormente obtidos por um hectare de desmatamento, e os pagamentos por serviços ecossistêmicos podem ser necessários para garantir a provisão dos serviços ecossistêmicos globais e os benefícios. O custo social do desmatamento observado por uma nação da Amazônia depende das políticas de uso da terra dos outros países. Os autores argumentam que os pagamentos pelos serviços ecossistêmicos globais para a floresta podem prover o aporte financeiro necessário para um novo paradigma do desenvolvimento sustentável, no qual a floresta Amazônica é vista como um bem público global.

Com relação à agricultura de corte e queima, os custos totais envolvem o esgotamento de nutrientes do solo e a redução do rendimento a longo prazo, podem não ser suportados pela pessoa que originalmente desmatou a floresta, mas pela sociedade. Para o agricultor individual, os benefícios percebidos da adoção da agricultura de corte e queima superam os custos sociais percebidos de corte e queima. Enquanto as políticas de

posse da terra promoverem a adoção de corte e queima como método de produção, os agricultores continuarão a adotar essa prática nas regiões tropicais. (SCHUCK ET AL., 2002)

Além do custo social, existem custos envolvidos também para a preservação do meio-ambiente. Desbureaux e Brimont (2015) expuseram as múltiplas dimensões do custo para acabar com a agricultura de corte e queima em Madagascar dado que essa é uma das principais razões para o desmatamento nesse país. A excepcional variedade de espécies de plantas e animais faz com que haja uma preocupação pela preservação da sua biodiversidade. Contudo, o país tem um índice de desenvolvimento humano baixo, elevado crescimento populacional e uma falta de alternativas econômicas disponíveis, além de baixo investimento governamental no setor agrário, o que contribui para a busca por novos terrenos para a agricultura, levando a um aumento do desmatamento. A agricultura de corte e queima está adaptada às restrições econômicas e ambientais desse país e é também considerada uma prática social, que tem relação com as crenças e rituais da população. A disposição dos fazendeiros para não aderir mais a essa prática está impulsionada mais por fatores socioculturais do que econômicos. Contudo, quando os fazendeiros aceitam parar a queima em troca de uma indenização, quanto maior a perda de lucros potenciais, maior é o pedido de compensação. Os autores concluem que no curto prazo, o que impediria uma situação na qual há preservação ambiental e respeito à cultura das comunidades seria justamente o contexto social em que vivem os fazendeiros.

2.5. Políticas ambientais e outras intervenções

Para mitigar os impactos causados pelas queimadas, que têm como principais motivos a ação humana, as mudanças climáticas e a degradação ambiental aliada ao uso prévio do fogo, os governos federal e local implementam políticas para a prevenção e supressão das queimadas nas florestas. Algumas políticas incluem a proibição do uso parcial ou total do fogo na agricultura, subsídio para uso de técnicas alternativas e educação ambiental. (MORELLO, 2020)

Cammelli e Angelsen (2019) afirmam que a aplicação de políticas como o Código Florestal, pode ser eficaz contra incêndios não controlados: trata diretamente da fonte da externalidade - uso não controlado do fogo - alterando as crenças dos agricultores sobre o risco de incêndio, e está alinhada com a demanda por justiça dos agricultores, alavancando a aversão a esse risco.

Para amenizar e controlar os efeitos adversos das queimadas e do desmatamento, no Brasil, são implementados um conjunto de ações. A Secretaria de Política Econômica (SPE) do Governo Federal, por exemplo, tem em sua agenda de sustentabilidade, a formulação e o acompanhamento das seguintes políticas ambientais: Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia (PPCDAM); Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas no Cerrado – PPCerrado; Condicionantes ambientais para o crédito rural; Bolsa Verde (concessão de incentivo financeiro aos proprietários e posseiros); Pronaf Sustentável; Política Nacional de Pagamentos por Serviços Ambientais (PSA); Protocolo Verde; e o Acordo TFCA – Tropical Forest Conservation Act. Além disso, o desmatamento e as queimadas vêm sendo mitigados por ações que impactam no custo para o produtor, como as autuações por crimes ambientais.

Além das autuações ambientais, a literatura explora uma grande dimensão de práticas e políticas relacionados à mitigação das externalidades causadas pelo desmatamento e por outras ações humanas que têm efeitos negativos para o meio-ambiente. Para Jung e Polasky (2018), uma abordagem alternativa e que complementa as ações governamentais, envolve empresas multinacionais e organizações não governamentais (ONGs). Os incentivos que justificariam a participação das empresas a colaborar com o cumprimento dos regulamentos ambientais seriam a demanda do consumidor por produtos sustentáveis e os compromissos com a responsabilidade social. Com o poder de compra das empresas, os agricultores encontram incentivos para cumprir as leis ambientais. As ONGs, por sua vez, podem garantir que os padrões ambientais sejam respeitados e oferecem conhecimentos técnicos que facilitam o monitoramento ambiental.

Santiago e Couto (2020) alegam que, em países subdesenvolvidos, a relação entre as características socioeconômicas e a área coberta por floresta parece indicar um problema de ordem ambiental e é relevante entender essa relação ao propor uma possível adaptação aos modelos de desenvolvimento atuais. Para os autores, as florestas são responsáveis pelo sequestro do carbono e por uma série de fatores capazes de atenuar os efeitos das mudanças climáticas, além de proteger a biodiversidade e os rios. Considerando que o homem é capaz de modificar os recursos naturais, questionaram se o desenvolvimento econômico e social ocorreu sem uma perda considerável de floresta nativa. Eles avaliaram a relação entre o desmatamento no Brasil e o desenvolvimento econômico, de 2000 a 2010 e, estratificado pela taxa de desmatamento, propuseram um

modelo com conservação florestal. Com isso, buscaram compreender a relação entre o desenvolvimento econômico e o desmatamento no Brasil, propondo uma possível adaptação para o progresso atual. Os resultados mostraram que o aumento da eficiência agrícola, por meio de técnicas modernas e aumento da densidade do gado, por exemplo, pode aumentar o desenvolvimento econômico de maneira duradoura sem prejudicar a cobertura florestal. Em regiões com uma agricultura mais desenvolvida, a perda florestal foi reduzida ou se estabilizou, em especial na fronteira leste da Amazônia brasileira.

De fato, a melhoria das técnicas e da tecnologia empregada pode ter relação com a diminuição de práticas danosas ao meio-ambiente. Em Combes et al. (2017) avaliou-se como um melhor acesso ao capital físico por meio de gastos e crédito público influenciou a perda de cobertura florestal. Um melhor acesso ao capital físico, como máquinas e equipamentos, através do crédito interno e dos gastos públicos é uma das formas de se reduzir o desmatamento. Contudo, o capital antrópico pode fomentar o desmatamento quando é substituto ao capital natural. Segundo eles, os países em desenvolvimento possuem capital natural que gera um conflito de interesses entre as metas ambientais e de desenvolvimento. No estudo, as investigações econométricas, no período de 2001 a 2012, mostraram que a perda de cobertura florestal era positivamente influenciada pelo crédito e pelos gastos públicos, logo um melhor acesso ao capital era prejudicial para a floresta. Para eles, o objetivo de facilitar o acesso ao capital gerado pelo homem não pode ser abordado sem enfrentar o objetivo de proteção ambiental.

Para Reydon et al. (2020), melhorias na governança da terra no Brasil são as condições que permitiram uma redução do desmatamento da Floresta Amazônica. Uma das principais causas do desmatamento seria a falta de clareza sobre os direitos de propriedade do uso da terra. Esse desmatamento ocorre, em maioria, em terras que estão sob controle direto ou indireto do Estado. O governo brasileiro adotou algumas medidas para melhorar a administração da terra, incluindo melhorias no programa Terra Legal, que aborda problema de terras públicas em grades áreas da Amazônia. Reydon et al. (2020), discutiram que a governança participativa da terra pode desempenhar melhoria do uso e da propriedade através de impostos sobre a terra.

Barua et al. (2012) analisaram os impactos do pagamento de carbonos e imposto sobre a renda na redução de florestas tropicais sob uma estrutura de equilíbrio de mercado. Os resultados indicaram que os impostos sobre os rendimentos da colheita e da silvicultura poderiam ser ineficazes para conter a perda de florestas. Os pagamentos de carbono, por sua vez, reduziriam efetivamente a derrubada de florestas. No estudo, um

pagamento de carbono de € 30 por tonelada de carbono limitaria o desmatamento a 10% da cobertura florestal existente. Um sistema reversível de crédito de carbono, no qual um detentor da floresta pode resgatar uma floresta creditada, pareceu aumentar a eficácia dos pagamentos de carbono, a curto prazo. Os pagamentos de carbono complementaríamos também o imposto sobre a colheita, contendo a perda das florestas tropicais. Os resultados numéricos em Barua et al. (2012) mostraram que os pagamentos de carbono pela retenção de florestas tropicais podem fazer com que um detentor privado de florestas responda mais aos custos da terra ao tomar decisões sobre o desmatamento, tendo a floresta preservada maior valor, o que faz com que haja menos desmatamento.

As transferências financeiras geralmente são feitas dos países mais desenvolvidos para os menos desenvolvidos com o objetivo de melhorar a conservação florestal. Fredj et al. (2004) tratam do desmatamento, considerando dois jogadores com diferentes utilidades para a conservação ambiental. Eles estavam preocupados com a questão que envolve países mais ricos a ajudar na conservação das florestas dos países mais pobres. Os países mais ricos agiriam como principais em um jogo Stackelberg. O primeiro jogador representa um conjunto de países que tenta maximizar a área de floresta tropical em um certo período. O segundo jogador deve escolher entre explorar a floresta e exercer uma atividade agrícola. O desmatamento seria uma externalidade internacional. Os benefícios de preservar a floresta, a um nível de país, seriam pequenos se comparados aos benefícios globais. Os resultados mostraram que uma função de transferência que depende diretamente da taxa de desmatamento e do estoque florestal têm um impacto na redução do desmatamento.

Martín-Herrán et al. (2006) também usaram um jogo de Stackelberg para analisar a função de transferência em diferentes cenários nos quais os jogadores são as nações que transferem dinheiro a outros países, para solucionar os problemas ambientais, e os países que recebem essa transferência. O país doador tem o papel de líder e a nação que recebe ajuda é a seguidora. Quando há troca de informações entre os jogadores, as condições das florestas tanto no curto quanto no longo prazo melhoram.

Stabile et al. (2019) afirmam que o paradigma do crescimento horizontal da agricultura sobre os ecossistemas traz resultados sociais e ambientais negativos. O artigo deles propõe quatro estratégias que podem reduzir o desmatamento, ao mesmo tempo em que há aumento da produção e do bem-estar social: a eliminação da grilagem de terras e especulação através da designação de florestas públicas, a redução do desmatamento nas propriedades privadas, o incentivo ao aumento da produtividade em propriedades de

médio e grande porte por meio de investimentos direcionados, e a assistência técnica para pequenos produtores para garantir melhoras econômicas, ambientais e sociais. Os autores argumentam que as estratégias devem ser coordenadas para promover uma melhora econômica, social e trazer ganhos para o Brasil, além de gerar repercussão internacional. A demanda por produtos brasileiros no exterior é elevada e práticas que visam a diminuição dos efeitos da emissão de gases do efeito estufa, aliados à conservação dos ecossistemas transformariam o país em líder na gestão do uso da terra e dos seus recursos, defendem os autores.

Análises estatísticas feitas por Seidl et al. (2001) revelam que as condições da terra e da saúde dos animais, intensificação da agricultura, população, pastagem natural e a localidade da infraestrutura e mercados regionais influenciam a magnitude da área desmatada para implementação de pastos. No estudo, a propensão dos proprietários de pequenos produtores de terra em escolher o desmatamento era similar à dos grandes fazendeiros. De uma perspectiva política, eles propõem que as ações de mitigação devem ser voltadas aos proprietários de terrenos maiores, dado que uma maior porção de terra implica em uma maior atividade de desmatamento e uma maior área poderia ser afetada com mudanças de comportamento de um pequeno número de pessoas.

Rodrigues et al. (2009) estudam um jogo com dois jogadores que aborda o desmatamento nas relações entre o ser humano e o meio-ambiente. Cada proprietário deve administrar uma parte do terreno que pode ser floresta, agricultura ou abandonada. As estratégias envolvem conservar ou desmatar. A escolha pelo desmatamento oferece bons retornos financeiros ao proprietário, mas degrada os serviços do ecossistema da floresta produzidos em uma parcela de terra que pertence a outro proprietário de terra. A decisão de cada proprietário depende da utilidade esperada perdida por cada estratégia. Essa perda de utilidade leva em consideração a utilizada presente e a futura recebidas, que dependem de um estado de transição das duas parcelas de terra. Esse estado de transição é uma cadeia de Markov que incorpora as decisões sobre o desmatamento, do abandono agrícola e da regeneração florestal.

O estudo de Rodrigues et al. (2009) descobriu que uma regeneração lenta das florestas favorece a conservação florestal. O dilema da caça ao veado é mais provável de ocorrer sob um fornecimento de recursos insustentáveis, com regeneração lenta da floresta e abandono rápido da agricultura. O dilema dos prisioneiros é provável de acontecer quando há um fornecimento persistente e circulante de recursos, com regeneração rápida da floresta e o abandono agrícola ocorrendo lentamente ou

rapidamente. Os resultados mostraram como os seres humanos e o meio-ambiente definem a estrutura do dilema da administração da floresta, sendo que as soluções para os dilemas dependem das propriedades do meio-ambiente. Em florestas temperadas, que regeneram lentamente, regulamentos que aumentam a confiança entre os proprietários de terra levam os proprietários a acreditar que os outros escolherão uma estratégia para a conservação da floresta. Em florestas tropicais, por outro lado, onde a regeneração é mais rápida, uma intervenção política que altere o valor da conservação da floresta e do desmatamento pode ser mais útil para deter o desmatamento.

É possível perceber a importância da preservação ambiental na literatura e maneiras de minimizar os danos causados pela ação humana, em particular o desmatamento causado pelo uso do fogo. Nas próximas seções desenvolvemos um modelo de jogo agregativo para analisar o que acontece no equilíbrio quando as estratégias dos fazendeiros envolvem a decisão por desmatar e queimar parte do seu terreno para uso, assim como analisamos empiricamente os resultados observados com dados da Amazônia Legal.

3. Modelo de jogo agregativo para a análise da externalidade do desmatamento e cálculo de equilíbrio de Nash

O estudo de Rodrigues et al. (2009) desenvolvia um modelo teórico de jogos que aliava o comportamento de escolha dos proprietários e as dinâmicas ecológicas. Eles investigaram situações nas quais o jogo do desmatamento leva a dilemas sociais e que tipos de dilemas são esses.

Uma intervenção política, como um subsídio ou um aumento dos impostos encorajaria uma transição do comportamento de desmatar para o de conservar, tirando os participantes de uma situação abaixo do ótimo. A probabilidade de um dilema social ocorrer não é influenciada por mudanças nos fatores econômicos, mas pelos fatores ambientais, que seriam as taxas de regeneração da floresta, o abandono da agricultura e a extensão da degradação da floresta devidos ao desmatamento. (RODRIGUES ET AL., 2009)

Neste capítulo desenvolvemos um modelo de jogo agregativo para analisar a externalidade e o equilíbrio de Nash para o desmatamento causado pelas queimadas. Analisamos o equilíbrio a partir de uma situação hipotética que envolve fazendeiros e a decisão de queimar parte do terreno para a agricultura. Essa decisão envolve externalidades negativas, pois as queimadas e o desmatamento, embora sejam boas para o fazendeiro, já que aumentariam sua produção, pode ter impactos negativos por prejudicarem o meio-ambiente em geral diminuindo assim a produtividade da terra.

Desta maneira, investigamos a situação em que haveria um equilíbrio para que o fazendeiro possa queimar uma determinada área e as externalidades causadas sejam controladas. Investigamos também o impacto do custo nas decisões de queimar do fazendeiro, no caso, o custo escolhido para a análise foi o pagamento de uma multa, por exemplo.

3.1. Jogos agregativos

De acordo com Martimort e Stole (2012), um jogo agregativo é um jogo na forma normal com a propriedade de que o *payoff* de cada jogador é uma função da sua própria estratégia e do agregado do perfil de estratégias de todos os jogadores. Tais jogos possuem propriedades que podem levar a caracterizações simples do equilíbrio no agregado sem que seja preciso resolver para o perfil de estratégia de equilíbrio. Para eles, esse tipo de

jogo é útil para provar a existência de equilíbrio em jogos de contratação em que os concorrentes principais usam contratos de incentivo para influenciar o agente comum, por exemplo. No caso da seleção adversa, resolver um simples problema de otimização é o suficiente para provar a existência de equilíbrio não-trivial e definir as distorções. Para o caso do risco moral, resolver um problema do mesmo tipo se demonstra suficiente para definir o equilíbrio agregado. Essas aplicações mostram a qualidade das técnicas de agregação para simplificar as dificuldades enfrentadas na busca do equilíbrio e a definir as propriedades em jogos do agente comum.

Um jogo agregativo completo, segundo Cornes e Hartley (2011), é um jogo no qual os *payoffs* e os *payoffs* marginais dependem somente da estratégia adotada pelo jogador e de uma função agregadora do perfil de estratégias comum a todos os jogadores. Eles definem a forma que esse jogo possui e mostram que o jogo é estrategicamente equivalente a um jogo que tem como função a soma das estratégias. No artigo de Belgioioso e Grammatico (2017) são mostradas as condições necessárias e suficientes que garantem a convergência do equilíbrio nos jogos agregativos generalizados.

3.2. A Tragédia dos comuns e o modelo

Lloyd (2007) ilustra a tragédia dos comuns de Hardin (1968) como uma área de pastagem comum usada por 10 fazendeiros na qual cada fazendeiro possui 10 ovelhas no pasto comum. Quando um fazendeiro aumenta o seu rebanho em 10%, aumenta sua produtividade individual e o dano causado por um animal a mais no pasto é relativamente pequeno. A tragédia ocorreria se todos os fazendeiros decidissem aumentar seus ganhos pessoais, esgotando os recursos e acabando com o bem comum, que no caso seria o pasto.

Para Hardin (1968), a lógica da tragédia dos comuns tem sido entendida desde os primórdios da agricultura e da propriedade privada. O pastor racional conclui que o único caminho a ser seguido é aumentar o rebanho, mas cada pastor estaria preso em um sistema que o faria produzir infinitamente em um mundo onde os recursos não são infinitos.

Diversas situações que envolvem externalidades negativas ao meio-ambiente causadas pela ação humana podem ser relacionadas à tragédia dos comuns. O artigo de Lloyd (2007), por exemplo, analisa o artigo de Hardin (1968) do ponto de vista do aquecimento global causado pela atividade humana e o esgotamento das reservas de petróleo e propõe algumas soluções, que são comparadas ao Protocolo de Kyoto e o Protocolo de Rimini. Os dois problemas estariam relacionados, pois uma das causas

principais da emissão de gás carbônico na atmosfera são as atividades humanas que utilizam petróleo e seus subprodutos.

Modelos que envolvem o uso da teoria dos jogos são muito utilizados para analisar situações que envolvem recursos comuns. Esse tipo de recurso é caracterizado pela dificuldade em impedir que os atores o utilizem e pelo fato de que a exploração por um dos atores diminui a disponibilidade do recurso para os outros. A tragédia dos comuns de Hardin (1968) forneceu uma metáfora para que o comportamento dos usuários dos recursos comuns pode causar consequências desastrosas, no qual os usuários não têm capacidade para se unir coletivamente para se livrar do uso excessivo e da destruição do recurso, o que leva a um dilema social. (RODRIGUES ET AL., 2009)

No modelo desenvolvido neste capítulo, os fazendeiros têm uma área disponível para as atividades agropecuárias na qual podem escolher queimar ou não. Quando a decisão pelo desmatamento por queimadas é pequena, ou seja, a área utilizada é pequena, o proprietário conseguiria aumentar sua produção individual, e o dano causado seria pequeno. Mas, quando todos os fazendeiros decidem aumentar a área desmatada, o aumento da produção individual no agregado geraria danos ao meio-ambiente que se refletiriam negativamente na quantidade e qualidade da produção, dado que os recursos naturais disponíveis se tornariam escassos ou ter a qualidade afetada. Neste sentido, o modelo aqui desenvolvido se encaixa nessa família de problemas da tragédia dos comuns; assim, um controle público da externalidade negativa se torna necessária e a sua efetividade deve ser mensurada.

3.3. Caso Geral

Seja T a dimensão total do terreno disponível permitido para as atividades agropecuárias. Existem $N \geq 2$ fazendeiros, tal que o fazendeiro $n = 1, 2, \dots, N$ possui uma porção de terra t_n . Portanto:

$$\sum_{n=1}^N t_n = T. \quad (1)$$

O fazendeiro n tem por estratégia desmatar ou queimar uma fração $\alpha_n \in [0, 1]$ do seu terreno para preparar a terra para agricultura, por exemplo. Dessa forma, a terra

destinada ao uso dessa estratégia é $\alpha_n t_n$. Seja D o total desmatado ou queimado na região, ou seja, $D = \sum_{n=1}^N \alpha_n t_n$; $A(D)$ a externalidade na produção resultante do desmatamento total, e $\rho \in (0,1)$ a elasticidade de produção da terra. Por simplicidade, suporemos que o único insumo para a produção é a terra, então a função de produção do agricultor n é definida como:

$$q_n = A(D)(\alpha_n t_n)^\rho = [A(D)t_n^\rho] \alpha_n^\rho \quad (2)$$

Assumimos a seguinte hipótese:

Hipótese 1: A função $A(D)$ é decrescente, côncava e diferenciável.

A externalidade causada pelo desmatamento diminui a produtividade da terra ($A'(D) < 0$). Na medida em que o desmatamento global aumenta, as condições ambientais necessárias à produção pioram. A queda na produtividade é a taxas crescentes, ou seja, para níveis pequenos de desmatamento, o efeito marginal é pequeno. Para níveis altos de desmatamento, o efeito marginal é grande. ($A''(D) < 0$).

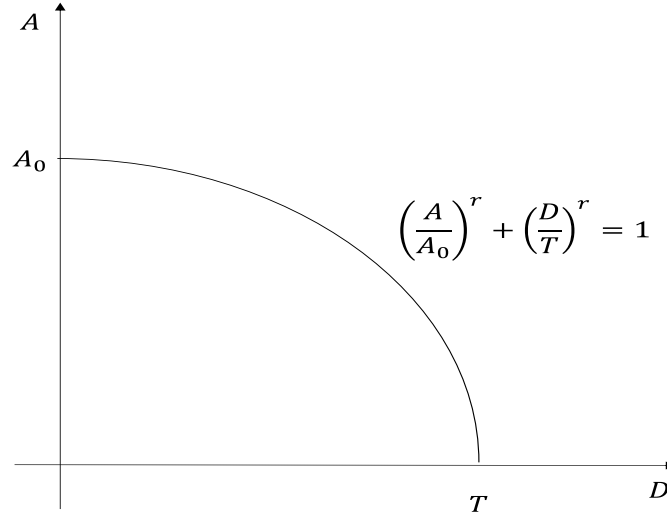
Como exemplo para análise, podemos considerar a seguinte forma funcional para a externalidade $A = A(D)$:

$$A(D) = A_0 \left[1 - \left(\frac{D}{T} \right)^r \right]^{1/r}. \quad (3)$$

A forma funcional (3) derivou-se da equação $\left(\frac{A}{A_0} \right)^r + \left(\frac{D}{T} \right)^r = 1$, em que A_0 é a máxima produtividade da terra e $r > 1$ é um parâmetro estrutural. O gráfico é mostrado a seguir para o caso no qual $r \geq 1$, na Figura 1:

Figura 1: Esboço do gráfico da produtividade (A) versus a área total desmatada

$$(D): \left(\frac{A}{A_0}\right)^r + \left(\frac{D}{T}\right)^r = 1$$



Fonte: Elaboração própria. (2021)

O valor A_0 representa a produtividade máxima da terra disponível para a atividade agropecuária, quando as condições ambientais são as melhores. À medida em que a área desmatada/queimada D aumenta, a produtividade $A(D)$ diminui; quando D é próximo de zero, a produtividade cai levemente e, quando D é próximo da área total disponível T , a queda na produtividade é mais acentuada. Dessa forma, precisamos ter $r > 1$.

Para a forma funcional (3), $A'(D)$ resulta:

$$\frac{dA}{dD} = -\left(\frac{A_0}{T}\right)^r \left(\frac{D}{A}\right)^{r-1} \quad (4)$$

Utilizando elasticidades, temos que:

$$-\varepsilon_{A,D} = -\frac{D}{A} \frac{dA}{dD} = -\frac{\left(\frac{D}{T}\right)^r}{\left(\frac{A}{A_0}\right)^r} = -\frac{\left(\frac{D}{T}\right)^r}{1 - \left(\frac{D}{T}\right)^r} = 1 - \frac{1}{1 - \left(\frac{D}{T}\right)^r} \quad (5)$$

Dessa maneira, podemos perceber que quando o desmatamento aumenta, a elasticidade da produtividade $\varepsilon_{A,D} = \varepsilon(D)$ diminui. Também temos que $\varepsilon(0) = 0$ e $\varepsilon(T) = -\infty$.

O custo da produção é não linear na quantidade de terra disponível, ou seja:

$$c_n(\alpha_n) = k_n t_n \alpha_n. \quad (6)$$

Em que $k_n \geq 0$ é o custo marginal da terra desmatada, que pode incluir eventuais multas por desmatamento. Desta maneira, ao fazermos análise de estática comparativa aumentando o valor de k_n poderemos avaliar efeitos de aumento de multas por queimadas.

Em um jogo agregativo, o *payoff* de cada jogador é uma função da estratégia individual do jogador e de uma agregação (geralmente aditiva) das estratégias de todos os jogadores. Assim, a utilidade (*payoff*) do fazendeiro n , quando ele decide desmatar ou queimar uma fração α_n do terreno dele e quando os outros fazendeiros decidem desmatar α_{-n} , respectivamente, é:

$$u_n(\alpha_n, \alpha_{-n}) = [A(D)t_n^\rho] \alpha_n^\rho - (k_n t_n) \alpha_n \quad (7)$$

Em que D é dada por $D = \sum_{n=1}^N \alpha_n t_n$. Dessa forma, temos a seguinte proposição:

Proposição 1: Com a Hipótese 1, o jogo agregativo $\{[0,1], u_n\}_{n=1}^N$ tem equilíbrio de Nash.

Demonstração: Os conjuntos de estratégias individuais $[0,1]$ são não-vazios, compactos e convexos. As utilidades são contínuas e quase-côncavas; de fato, são côncavas, pois temos que, na equação (7), considerando que o argumento D tem α_n , a primeira derivada é:

$$u'_n(\alpha_n, \alpha_{-n}) = A'(D) t_n^{\rho+1} \alpha_n^\rho + \rho A(D) t_n^\rho \alpha_n^{\rho-1} - k_n t_n$$

A segunda derivada é:

$$\begin{aligned} u''_n(\alpha_n, \alpha_{-n}) &= \\ &= A''(D) t_n^{\rho+2} \alpha_n^\rho + \rho A'(D) t_n^{\rho+1} \alpha_n^{\rho-1} + \rho A'(D) t_n^{\rho+1} \alpha_n^{\rho-1} + \rho(\rho-1)A(D)t_n^\rho \alpha_n^{\rho-2} \\ &\Rightarrow u''_n(\alpha_n, \alpha_{-n}) = A''(D) t_n^{\rho+2} \alpha_n^\rho + 2\rho A'(D) t_n^{\rho+1} \alpha_n^{\rho-1} + \rho(\rho-1)A(D)t_n^\rho \alpha_n^{\rho-2} \end{aligned}$$

No segundo membro, o primeiro termo tem $A''(D) < 0$, o segundo termo tem $A'(D) < 0$ e o terceiro termo tem $\rho - 1 < 0$; portanto $u_n''(\alpha_n, \alpha_{-n}) < 0$, para todo n .

Portanto, utilizando o teorema de Nash, existe equilíbrio (em estratégias puras). $\square$

3.4. Existência de Equilíbrio Interior

Um equilíbrio de Nash é um perfil $(\alpha_1^*, \alpha_2^*, \dots, \alpha_N^*)$ tal que para todo $n = 1, 2, \dots, N$ se cumpre:

$$u_n(\alpha_n^*, \alpha_{-n}^*) \geq u_n(\alpha_n, \alpha_{-n}^*), \quad \forall \alpha_n \in [0, 1]. \quad (8)$$

Um perfil de estratégias de estratégias $(\alpha_1^*, \alpha_2^*, \dots, \alpha_N^*)$, é um equilíbrio de Nash interior (i.e. $0 < \alpha_i^* < 1$, para todo i) se as condições de primeira ordem são:

$$\frac{\partial u_n}{\partial \alpha_n}(\alpha_n^*, \alpha_{-n}^*) = 0 \Leftrightarrow t_n^\rho A'(D) t_n \alpha_n^\rho + \rho t_n^\rho A(D) \alpha_n^{\rho-1} - k_n t_n = 0 \quad (9)$$

Dividindo (9) por t_n e reordenando os termos, temos:

$$A(D) \left[\left(\frac{\alpha_n t_n}{D} \right) \varepsilon(D) + \rho \right] = k_n (\alpha_n t_n)^{1-\rho}; \quad (10)$$

Temos a seguinte proposição:

Proposição 2: Com a Hipótese 1, se existe Equilíbrio de Nash interior, então ele é único.

Demonstração: O Equilíbrio de Nash interior deve cumprir a equação (10). Notamos que, para cada $D > 0$, podemos escrever cada lado da equação (10) como uma função da estratégia do jogador:

$$f(\alpha_n) = A(D) \left[\left(\frac{\alpha_n t_n}{D} \right) \varepsilon(D) + \rho \right] = \left(\frac{A(D) \varepsilon(D) t_n}{D} \right) \alpha_n + \rho A(D) \quad (11)$$

$$g(\alpha_n) = k_n (\alpha_n t_n)^{1-\rho} = (k_n t_n^{1-\rho}) \alpha_n^{1-\rho} \quad (12)$$

Afirmção 1: Para cada $D > 0$ existe um único $\widetilde{\alpha}_n(D)$ tal que:

$$f(\widetilde{\alpha}_n(D)) = g(\widetilde{\alpha}_n(D)) \quad (13)$$

Utilizando a fórmula da elasticidade $\varepsilon(D)$:

$$\varepsilon(D) = \frac{D}{A} A'(D) \quad (14)$$

Podemos escrever:

$$f(\alpha_n) = \rho A(D) + t_n A'(D) \alpha_n \quad (15)$$

que é uma função estritamente decrescente, $f(0) = \rho A(D) > 0$, $f(1) = \rho A(D) + t_n A'(D)$. Como a função $g(\alpha_n)$ é estritamente crescente, $g(0) = 0$ e $g(1) = k_n t_n^{1-\rho} > f(1)$.¹

Portanto, existe um único $\widetilde{\alpha}_n(D)$ que cumpre (13). c.q.d.

Afirmção 2: A função $\widetilde{\alpha}_n(D)$ é estritamente decrescente.

Para provar esta afirmação, seja $\widehat{D} > D$. Então temos que $A(\widehat{D}) < A(D)$ e $A'(\widehat{D}) < A'(D)$, de acordo com a Hipótese 1. Ou seja, como a função $A(D)$ é decrescente e côncava, quando D aumenta, $A(D)$ e $A'(D)$ diminuem.

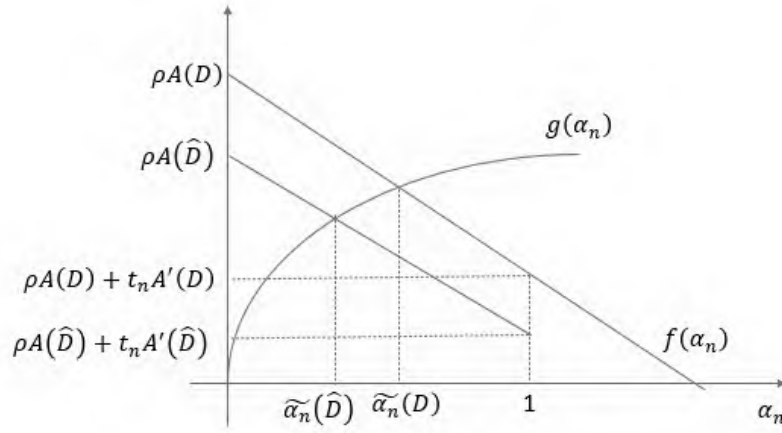
Portanto, a função $f(\alpha_n)$ diminui (se desloca verticalmente para abaixo) e a função $g(\alpha_n)$ (como não depende de D) permanece a mesma, tal e como mostra a Figura 2. Assim, a interseção $\widetilde{\alpha}_n(\widehat{D})$ (única, pela Afirmção 1) está mais à esquerda que $\widetilde{\alpha}_n(D)$, e portanto,

$$\widetilde{\alpha}_n(\widehat{D}) < \widetilde{\alpha}_n(D) \quad (16)$$

Essa situação pode ser observada na Figura 2 abaixo: c.q.d.

¹ A condição $g(1) > f(1)$ é necessária para que o equilíbrio seja interior.

Figura 2: Gráfico ilustrando $f(\tilde{\alpha}_n(D)) = g(\tilde{\alpha}_n(D))$



Fonte: Elaboração própria. (2021)

Finalmente, para provar a Proposição 2, notemos que o agregado D correspondente ao equilíbrio de Nash deve satisfazer:

$$\sum_{n=1}^N \tilde{\alpha}_n(D) t_n = D \quad (17)$$

O lado direito, como função de D , é uma função estritamente crescente. Pela Afirmação 2, o lado esquerdo é uma função estritamente decrescente (pois os $\tilde{\alpha}_n(D)$ o são). Assim, o equilíbrio de Nash resulta único. $\square$

A seguir, serão analisados três casos: I) quando a tecnologia é linear ($\rho = 1$); II) quando a tecnologia não é linear, mas os custos marginais dos fazendeiros são iguais ($k_n = k$, para todo n); e III) o caso no qual a tecnologia não é linear e as fazendas são heterogêneas (k_n 's diferentes e tamanhos de fazenda t_n diferentes).

3.4.1 Caso I

No caso I supomos que a tecnologia é linear ($\rho = 1$). A equação (10) se reduz a:

$$A(D) \left[\left(\frac{\alpha_n t_n}{D} \right) \varepsilon(D) + 1 \right] = k_n \quad (18)$$

Somando em n teremos:

$$A(D)[\varepsilon(D) + N] = K \equiv \sum_{n=1}^N k_n \quad (19)$$

Resolvendo (19), calcula-se D e substituindo na equação (18) temos a parcela ótima que cada fazendeiro desmata:

$$\alpha_n^* = \frac{D}{t_n \varepsilon(D)} [k_n A^{-1}(D) - 1] \quad (20)$$

Proposição 3: Com a Hipótese 1 e tecnologia linear ($\rho = 1$) a área total desmatada depende da soma dos custos unitários desse desmatamento (K) e não da distribuição deles. Além disso, se K aumenta então D diminui.

Demonstração: Derivando a equação (19) implicitamente em relação a D , obtemos:

$$\frac{dA(D)}{dD} [\varepsilon(D) + N] + A(D) \frac{d\varepsilon(D)}{dD} = \frac{dK}{dD} \quad (21)$$

Pela Hipótese 1, $A'(D) = \frac{dA(D)}{dD} < 0$ e $A''(D) < 0$, logo, temos que

$$\frac{d\varepsilon(D)}{dD} = \frac{A(D)(DA''(D) + A'(D)) - DA'(D)^2}{A(D)^2} < 0$$

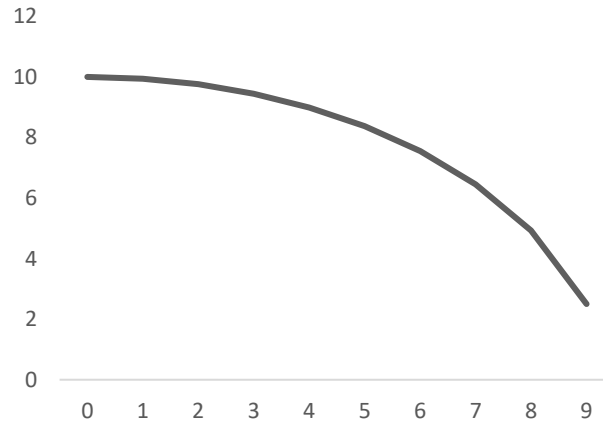
Pois $DA''(D) + A'(D) < 0$. Logo $\frac{dA(D)}{dD} [\varepsilon(D) + N] < 0$ e $A(D) \frac{d\varepsilon(D)}{dD} < 0$.

Portanto $\frac{dK}{dD} < 0$. $\square$

A Proposição 3 conclui, independentemente da forma funcional de $A(D)$, que há uma relação inversa entre multas e desmatamento. A Figura 3 abaixo ilustra o gráfico do custo (K) em função do desmatamento (D) para a forma funcional (3) utilizando $A_0 = 1$, $T = 10$ e $r = 2$. A partir da equação (20) podemos concluir que, se os custos forem

heterogêneos, então a fazenda que possuir maior custo marginal irá desmatar menos; ou seja, se $k_n > k_m$ então $\alpha_n t_n < \alpha_m t_m$.

Figura 3: Gráfico do custo (K) em função do desmatamento (D).



Fonte: Elaboração própria. (2021)

3.4.2. Caso II

No caso II consideramos que a tecnologia é não-linear ($\rho < 1$) e que os fazendeiros todos o mesmo custo $k_n = k$, para todo n . Com isso, a equação (11) pode ser reescrita como:

$$A(D) \left[\left(\frac{\alpha_n t_n}{D} \right) \varepsilon(D) + \rho \right] = k (\alpha_n t_n)^{1-\rho} \quad (22)$$

Proposição 4: Com a hipótese 1 e custos marginais iguais de desmatamento ($k_n = k$) todos os fazendeiros desmatam a mesma área, ou seja, $\alpha_n t_n = \alpha_m t_m$, para todo m e n . Em particular, fazendas maiores desmatam frações menores do seu terreno e vice-versa.

Demonstração: Seguindo um argumento semelhante ao da demonstração da Proposição 2, para cada $D > 0$ fixo, existe uma única solução $(\alpha_n t_n)$ da equação (22). Portanto:

$$\alpha_n t_n = \alpha_m t_m \Rightarrow \alpha_n = \alpha_m \left(\frac{t_m}{t_n} \right) \quad (23)$$

Assim, se $t_n > t_m$ então $\alpha_n < \alpha_m$. $\square$

A Proposição 4 permite concluir que, se observamos que fazendeiros com terrenos de tamanhos diferentes estão desmatando áreas de tamanho diferente, então ou eles têm custos marginais do desmatamento diferentes ou os retornos de escala não são decrescentes ($\rho = 1$).

Corolário 5: Se além das hipóteses da Proposição 4 temos que $\varepsilon(0) = 0$ e $\varepsilon(T) = -\infty$, então a área total desmatada é uma função decrescente de k e crescente de N . Em particular, existe uma relação crescente entre k e N que permite manter constante a área total desmatada.

Demonstração: Pela proposição 4, o desmatamento total é N vezes a área desmatada por cada fazendeiro, então podemos escrever:

$$\alpha_n t_n = \frac{D}{N} \quad (24)$$

Substituindo (24) na equação (22), obtemos:

$$A(D) \left[\left(\frac{1}{N} \right) \varepsilon(D) + \rho \right] = k \left(\frac{D}{N} \right)^{1-\rho} \quad (25)$$

A função $f(D) = A(D) \left[\left(\frac{1}{N} \right) \varepsilon(D) + \rho \right]$ é decrescente, pois temos:

$$f'(D) = \frac{1}{N} (A'(D)\varepsilon(D) + A(D)\varepsilon'(D)) + \rho A'(D) \quad (26)$$

Mas já tínhamos provado que $\varepsilon' < 0$, portanto $f'(D) < 0$. Com $f(0) = A_0\rho > 0$ e $f(T) = -\infty$. Por outro lado, a função: $g(D) = k \left(\frac{D}{N} \right)^{1-\rho}$ é estritamente crescente, com $g(0) = 0$ e $g(T) > 0$. Portanto, existe um único D^* tal que $f(D^*) = g(D^*)$.

Além disso, se k aumenta, então $g(D)$ aumenta, pois $\frac{dg(D)}{dk} = \left(\frac{D}{N}\right)^{1-\rho} > 0$, como $f(D)$ é decrescente, quando $g(D)$ aumenta, D^* diminui. E se N aumenta, então $f(D)$ aumenta, pois $\frac{df(D)}{dN} = A(D) \left[\left(\frac{1}{N^2}\right) \varepsilon(D) \right] > 0$ e $g(D)$ diminui, pois $\frac{dg(D)}{dN} = \frac{kD(1-\rho)\left(\frac{D}{N}\right)^{-\rho}}{N^2} < 0$ portanto D^* aumenta.

Agora, deixando fixo D , a equação (25) que define k em função de N é:

$$A(D) \left[\left(\frac{1}{N}\right) \varepsilon(D) + \rho \right] = k \left(\frac{D}{N}\right)^{1-\rho}$$

Colocando explicitamente:

$$k = \frac{A(D)\varepsilon(D)}{D^{1-\rho}} N^{-\rho} + \frac{\rho A(D)}{D^{1-\rho}} N^{1-\rho} \quad (27)$$

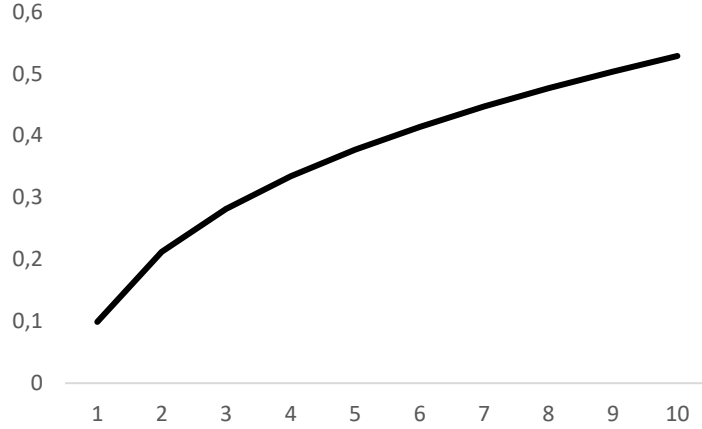
Como D é fixo, $A(D)$ e $\varepsilon(D)$ também o são. Então, derivando em relação a N :

$$\begin{aligned} \frac{dk}{dN} &= \left(\frac{A(D)\varepsilon(D)}{D^{1-\rho}} \right) (-\rho) N^{-\rho-1} + \left(\frac{\rho A(D)}{D^{1-\rho}} \right) (1-\rho) N^{-\rho} = \\ &= \left(\frac{A(D)\rho}{D^{1-\rho}} \right) N^{-\rho-1} [-\varepsilon(D) + (1-\rho)N] \end{aligned} \quad (28)$$

Como $\varepsilon < 0$ e $0 < \rho < 1$, então o termo em $[\cdot]$ é positivo, e como tudo o que está fora é positivo, resulta $\frac{dk}{dN} > 0$. $\square$

Para a Figura 4, foi feita uma simulação com os seguintes valores para cada parâmetro, partindo da equação (19): $r = 2, A_0 = 1, T = 10, D = 10$ e $\rho = 0,6$. Se o número de fazendeiros aumentar, para que a área desmatada não aumente, deve-se aumentar a multa por desmatamento. Esse aumento não necessariamente é proporcional. Isso pode ser verificado no gráfico da Figura 4.

Figura 4: Gráfico do custo (k) em função do número de fazendeiros (N)



Fonte: Elaboração própria. (2021)

3.4.3. Caso III

No caso III, assumimos a hipótese de que as fazendas são heterogêneas, ou seja, têm tamanhos diferentes, em consequência, custos diferentes ($k_1 \neq k_2$), e que a tecnologia é não-linear ($\rho < 1$). Suponhamos que existam apenas dois tipos de fazendas: $t_1 = \lambda T$ e $t_2 = (1 - \lambda)T$ em que o parâmetro $\lambda \in (0,1)$. Denotemos $\lambda_1 = \lambda$ e $\lambda_2 = (1 - \lambda)$.

Então a equação (10) resulta em um sistema não linear em (α_1, α_2) :

$$\begin{aligned} A(D) \left[\left(\frac{\alpha_1 \lambda_1 T}{D} \right) \varepsilon(D) + \rho \right] &= k_1 (\alpha_1 \lambda_1 T)^{1-\rho} \\ A(D) \left[\left(\frac{\alpha_2 \lambda_2 T}{D} \right) \varepsilon(D) + \rho \right] &= k_2 (\alpha_2 \lambda_2 T)^{1-\rho} \end{aligned} \quad (29)$$

Proposição 5: Com a Hipótese 1 e fazendas heterogêneas, se existe Equilíbrio de Nash interior, então ele é localmente único.

Demonstração: O Equilíbrio de Nash interior deve cumprir o sistema (29). Podemos escrever o sistema (29) como:

$$\begin{cases} f_1(\alpha_1, \alpha_2) = A(D) \left[\left(\frac{\alpha_1 \lambda_1 T}{D} \right) \varepsilon(D) + \rho \right] - k_1 (\alpha_1 \lambda_1 T)^{1-\rho} = 0 \\ f_2(\alpha_1, \alpha_2) = A(D) \left[\left(\frac{\alpha_2 \lambda_2 T}{D} \right) \varepsilon(D) + \rho \right] - k_2 (\alpha_2 \lambda_2 T)^{1-\rho} = 0 \end{cases} \quad (30)$$

As equações do sistema (30) podem ser representadas por $\mathbf{y} = f(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$. Cada equação $f_1(\mathbf{x}) = 0$ e $f_2(\mathbf{x}) = 0$ define uma hipersuperfície em $\mathbb{R}^2$, na qual a solução de $f(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$ é a interseção dessas hipersuperfícies, caso a interseção seja não vazia. Seja $\mathbf{x} = (\alpha_1^*, \alpha_2^*)$ a solução do sistema. O a Jacobiana, $J(\mathbf{x})$, de (30) no ponto (α_1^*, α_2^*) é não singular, ou seja, diferente de zero. De fato, temos que:

$$\begin{aligned} \det J(\alpha_1^*, \alpha_2^*) &= \begin{vmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \alpha_1}(\alpha_1^*, \alpha_2^*) & \frac{\partial f_1}{\partial \alpha_2}(\alpha_1^*, \alpha_2^*) \\ \frac{\partial f_2}{\partial \alpha_1}(\alpha_1^*, \alpha_2^*) & \frac{\partial f_2}{\partial \alpha_2}(\alpha_1^*, \alpha_2^*) \end{vmatrix} \\ &= \frac{\partial f_1}{\partial \alpha_1}(\alpha_1^*, \alpha_2^*) \frac{\partial f_2}{\partial \alpha_2}(\alpha_1^*, \alpha_2^*) - \frac{\partial f_2}{\partial \alpha_1}(\alpha_1^*, \alpha_2^*) \frac{\partial f_1}{\partial \alpha_2}(\alpha_1^*, \alpha_2^*) \\ &= \{A'(D)\lambda_1 T - k_1(1-\rho)(\alpha_1^* \lambda_1 T)^{-\rho} \\ &\quad + [A''(D)(\alpha_1^* \lambda_1 T) + A'(D)\rho]\lambda_1 T\} \cdot \{A'(D)\lambda_2 T - k_2(1-\rho)(\alpha_2^* \lambda_2 T)^{-\rho} \\ &\quad + [A''(D)(\alpha_2^* \lambda_2 T) + A'(D)\rho]\lambda_2 T\} \\ &\quad - \{[A''(D)(\alpha_2^* \lambda_2 T) + A'(D)\rho]\lambda_1 T\} \cdot \{[A''(D)(\alpha_1^* \lambda_1 T) + A'(D)\rho]\lambda_2 T\} \\ \det J(\alpha_1^*, \alpha_2^*) &\neq 0 \end{aligned}$$

Como a Jacobiana de (30) é não singular no ponto (α_1^*, α_2^*) , as equações de (30) são invertíveis na vizinhança de (α_1^*, α_2^*) . Dessa forma, pelo Teorema da Função Inversa, qualquer $f(\mathbf{x}) = \mathbf{y}$ tem uma solução única $\mathbf{x} = (\alpha_1^*, \alpha_2^*)$ tal que $\mathbf{y} = f(\alpha_1^*, \alpha_2^*)$. Portanto o Equilíbrio de Nash Interior é localmente único. $\square$

Proposição 6: Com custos diferentes ($k_1 \neq k_2$) e tecnologia não-linear ($\rho < 1$), α_i é função decrescente de k_i e crescente de k_j , para $i, j = 1, 2$ e $i \neq j$.

Demonstração: A utilidade (*payoff*) do fazendeiro n , de acordo com a equação (7), quando ele decide desmatar ou queimar uma fração α_n do terreno dele e quando os outros fazendeiros decidem desmatar α_{-n} , respectivamente, é:

$$u_n(\alpha_n, \alpha_{-n}) = [A(D)t_n^\rho] \alpha_n^\rho - (k_n t_n) \alpha_n$$

A condição de primeira ordem, CPO, da equação (7) é:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_n}{\partial \alpha_n} = 0 &\Leftrightarrow t_n^\rho A'(D) t_n \alpha_n^\rho + \rho t_n^\rho A(D) \alpha_n^{\rho-1} - k_n t_n = 0 \\ &\Rightarrow k_n = t_n^\rho A'(D) \alpha_n^\rho + \rho t_n^{\rho-1} A(D) \alpha_n^{\rho-1} \end{aligned} \quad (31)$$

Assim, a derivada de k_n em relação a α_n resulta em:

$$\frac{\partial k_n}{\partial \alpha_n} = t_n^{\rho+1} A''(D) \alpha_n^\rho + \rho t_n^\rho A'(D) \alpha_n^{\rho-1} + \rho t_n^\rho A'(D) \alpha_n^{\rho-1} + \rho(\rho-1) t_n^{\rho-1} A(D) \alpha_n^{\rho-2} < 0 \quad (32)$$

Por outro lado, a derivada de k_n em relação a α_m , com $m \neq n$, resulta em:

$$\frac{\partial k_n}{\partial \alpha_m} = t_n^\rho t_m A''(D) \alpha_n^\rho + \rho t_n^{\rho-1} t_m A'(D) \alpha_n^{\rho-1} < 0 \quad (33)$$

Seja $k_1 = f_1(\alpha_1, \alpha_2)$ e $k_2 = f_2(\alpha_1, \alpha_2)$, ou escrito de forma vetorial $k = f(\alpha)$. Pelo Teorema da Derivada da Função Inversa temos que, ao invertermos essas duas equações para escrever os α 's em função dos k 's: $\alpha_1 = g_1(k_1, k_2)$ e $\alpha_2 = g_2(k_1, k_2)$, ou de forma vetorial $\alpha = g(k)$. Então teremos que para todo $k = (k_1, k_2)$ se cumpre:

$$f(g(k)) = k \quad (34)$$

Derivando ambos os termos de (34), teremos:

$$\begin{aligned} D_\alpha f(g(k)) \times D_k g(k) &= \begin{bmatrix} \frac{\partial k_1}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial k_1}{\partial \alpha_2} \\ \frac{\partial k_2}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial k_2}{\partial \alpha_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = I \\ \Rightarrow D_k g(k) &= \left(D_\alpha f(g(k)) \right)^{-1} \text{ ou } D_k \alpha = (D_\alpha k)^{-1} \end{aligned}$$

Ou seja:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \alpha_1}{\partial k_1} & \frac{\partial \alpha_1}{\partial k_2} \\ \frac{\partial \alpha_2}{\partial k_1} & \frac{\partial \alpha_2}{\partial k_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial k_1}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial k_1}{\partial \alpha_2} \\ \frac{\partial k_2}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial k_2}{\partial \alpha_2} \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} \frac{\partial k_2}{\partial \alpha_2} & (-1) \frac{\partial k_1}{\partial \alpha_2} \\ (-1) \frac{\partial k_2}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial k_1}{\partial \alpha_1} \end{bmatrix} \quad (35)$$

Em que Δ é o determinante de $D_{\alpha}k$, ou seja $\Delta = \frac{\partial k_1}{\partial \alpha_1} \times \frac{\partial k_2}{\partial \alpha_2} - \frac{\partial k_1}{\partial \alpha_2} \times \frac{\partial k_2}{\partial \alpha_1}$. Calculando o determinante Δ , temos:

$$\begin{aligned}
\Delta &= (t_1^{\rho+1} A''(D) \alpha_1^{\rho} + \rho t_1^{\rho} A'(D) \alpha_1^{\rho-1} + \rho t_1^{\rho} A'(D) \alpha_1^{\rho-1} + \rho(\rho-1) t_1^{\rho-1} A(D) \alpha_1^{\rho-2}) \\
&\quad \times (t_2^{\rho+1} A''(D) \alpha_2^{\rho} + \rho t_2^{\rho} A'(D) \alpha_2^{\rho-1} + \rho t_2^{\rho} A'(D) \alpha_2^{\rho-1} + \rho(\rho-1) t_2^{\rho-1} A(D) \alpha_2^{\rho-2}) \\
&\quad + (t_1^{\rho} t_2 A''(D) \alpha_1^{\rho} + \rho t_1^{\rho-1} t_2 A'(D) \alpha_1^{\rho-1}) \times (t_2^{\rho} t_1 A''(D) \alpha_2^{\rho} + \rho t_2^{\rho-1} t_1 A'(D) \alpha_2^{\rho-1}) \\
&= t_1^{\rho+1} \alpha_1^{\rho} t_2^{\rho+1} \alpha_2^{\rho} (A''(D))^2 + 2 t_1^{\rho+1} \alpha_1^{\rho} \rho t_2^{\rho} \alpha_2^{\rho-1} A''(D) A'(D) \\
&\quad + t_1^{\rho+1} \alpha_1^{\rho} t_2^{\rho-1} \alpha_2^{\rho-2} \rho(\rho-1) A''(D) A(D) + 2 \rho t_1^{\rho} \alpha_1^{\rho-1} t_2^{\rho+1} \alpha_2^{\rho} A''(D) A'(D) \\
&\quad + 4 t_1^{\rho} \alpha_1^{\rho-1} t_2^{\rho} \alpha_2^{\rho-1} \rho^2 (A'(D))^2 + 2 t_1^{\rho} \alpha_1^{\rho-1} t_2^{\rho-1} \alpha_2^{\rho-2} \rho^2 (\rho-1) A'(D) A(D) \\
&\quad + t_1^{\rho-1} \alpha_1^{\rho-2} t_2^{\rho+1} \alpha_2^{\rho} \rho(\rho-1) A''(D) A(D) + 2 t_1^{\rho-1} \alpha_1^{\rho-2} t_2^{\rho} \alpha_2^{\rho-1} \rho^2 (\rho-1) A'(D) A(D) \\
&\quad + t_1^{\rho-1} \alpha_1^{\rho-2} t_2^{\rho-1} \alpha_2^{\rho-2} \rho^2 (\rho-1)^2 (A(D))^2
\end{aligned}$$

Como a tecnologia é não-linear, e $A(D)$ é estritamente decrescente e estritamente côncava, ou seja, $\rho < 1$, $A'(D) < 0$ e $A''(D) < 0$, então $\Delta > 0$. Com isso, temos que:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \alpha_1}{\partial k_1} &= \frac{1}{\Delta} \frac{\partial k_2}{\partial \alpha_2} < 0 \\
\frac{\partial \alpha_2}{\partial k_2} &= \frac{1}{\Delta} \frac{\partial k_1}{\partial \alpha_1} < 0 \\
\frac{\partial \alpha_1}{\partial k_2} &= \frac{1}{\Delta} (-1) \frac{\partial k_1}{\partial \alpha_2} > 0 \\
\frac{\partial \alpha_2}{\partial k_1} &= \frac{1}{\Delta} (-1) \frac{\partial k_2}{\partial \alpha_1} > 0
\end{aligned} \tag{36}$$

Portanto, por (36), α_i é função decrescente de k_i e crescente de k_j , para $i, j = 1, 2$ e $i \neq j$. $\square$

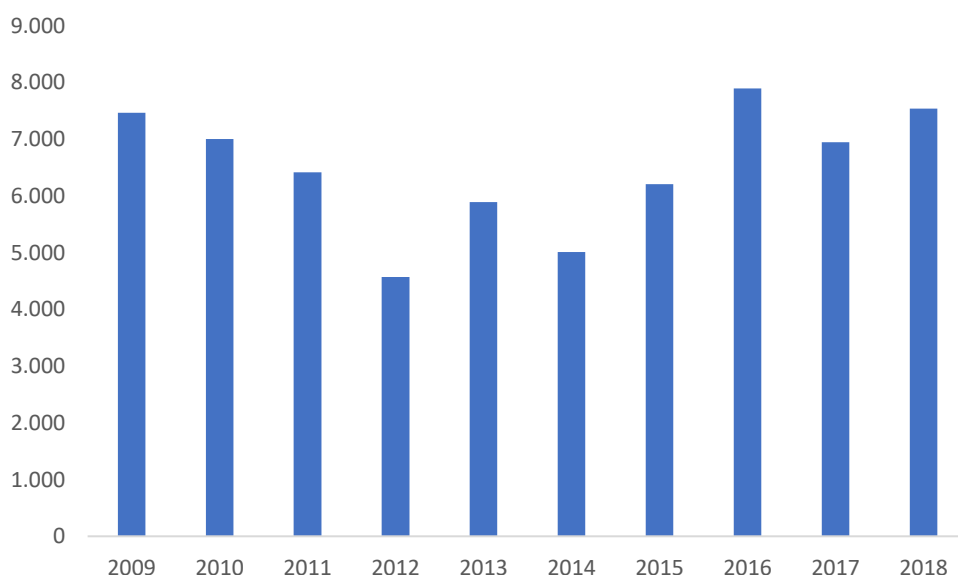
Dessa forma, quando uma multa é aplicada a um fazendeiro, ele decide por diminuir a fração queimada/desmatada do seu terreno. Assim, é possível perceber o efeito negativo da multa sobre o desmatamento. Contudo, se a multa aumentar para o fazendeiro 2, por exemplo, o fazendeiro 1 não teria motivos para diminuir a sua própria fração desmatada, pelo contrário, como em termos relativos a multa dele diminui, então ele vai preferir desmatar mais, ou seja, se k_2 aumenta, então α_1 aumenta, e vice-versa.

4. Análise empírica

A Amazônia Legal, conforme o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)² é formada pelos estados nos quais atua a Superintendência de Desenvolvimento da Amazônia – SUDAM. Os estados pertencentes à Amazônia Legal são: Amazonas, Amapá, Pará, Roraima, Rondônia, Acre, Tocantins, Maranhão e Mato Grosso. Sua superfície aproximada é de 5.015.067,749 km², o que corresponde a aproximadamente 58,9% do território brasileiro.

As taxas de desmatamento na Amazônia legal ao longo do tempo têm se mantido elevadas apesar da diminuição em alguns anos. Mello (2015) analisou os fatores responsáveis pela diminuição das taxas de desmatamento observadas para a Amazônia Legal nos anos de 2005 a 2013, encontrando que os fatores principais para a redução foram: a ausência de incentivos para desmatar dados os baixos preços de commodities e taxa de câmbio desvalorizada entre 2005 e 2007, a promulgação de um decreto do Banco Central que regulava o aumento do preço das commodities, a criação de áreas protegidas e o aprimoramento das medidas de fiscalização a partir dos dados do sistema DETER, produzido pelo INPE. A Figura 5 mostra as taxas de desmatamento de 2009 a 2018 para a Amazônia Legal.

Figura 5: Áreas de desmatamento (em Km²) na Amazônia Legal de 2009 a 2018

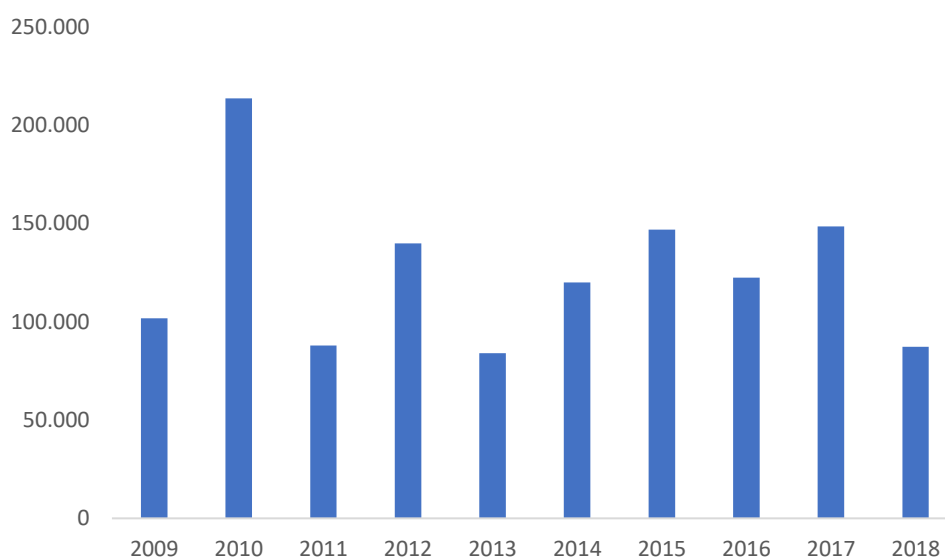


Fonte: INPE (2021a) /Elaboração própria. (2021)

² Fonte: IBGE (2021)

Os focos de queimadas ativos para a região da Amazônia Legal também se demonstram elevados, embora em alguns anos possa ter diminuído. A Figura 6 mostra os focos de queimadas ativos na Amazônia Legal para os anos de 2009 a 2018.

Figura 6: Focos de queimadas na Amazônia Legal de 2009 a 2018



Fonte: INPE (2021b) /Elaboração própria. (2021)

Algumas propriedades rurais do bioma da Amazônia são cadastradas no Sistema Nacional de Cadastro Rural (CAR). Esse cadastro é um dos requisitos também para que as propriedades recebam crédito rural. O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) disponibiliza informações sobre os focos de queimadas nas propriedades rurais cadastradas no CAR e para as que não estão cadastradas. As propriedades foram categorizadas conforme o tamanho e se possuem cadastro no CAR. A Figura 7 mostra os focos de queimadas por tipo de estabelecimento com a soma dos focos de 2019 e 2020. Percebe-se que propriedades sem cadastro no CAR e as pequenas propriedades apresentaram maiores focos de queimadas ativos registrados por satélite, enquanto as propriedades de médio e grande porte com registro no Cadastro Rural queimam menos.

As áreas desmatadas e os focos de queimadas elevados mostram a importância da implementação de políticas públicas e outras intervenções para deter o desmatamento e as queimadas na Amazônia Legal e no Bioma da Amazônia.

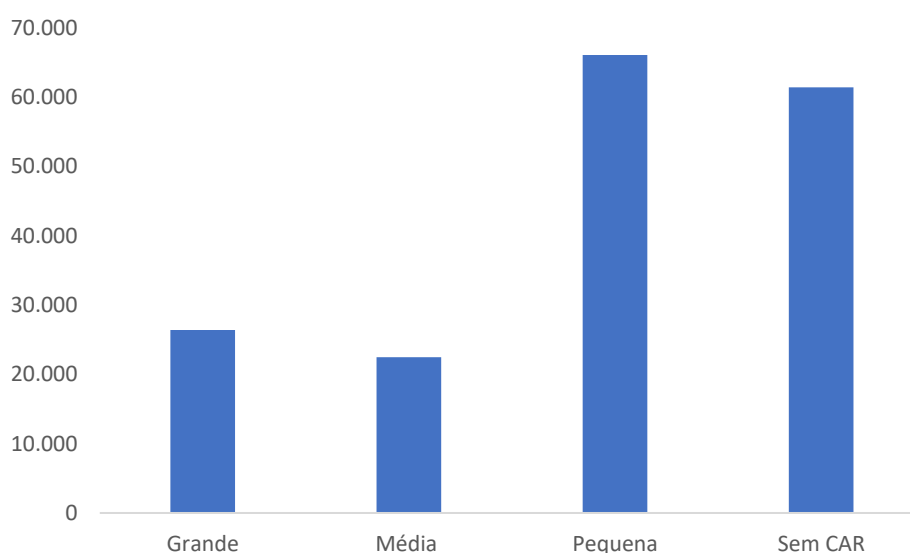
Nesta seção, dada a relevância e extensão da Amazônia Legal, pretendemos verificar os resultados previstos nas proposições da Seção 3 usando dados disponíveis para essa região. Usamos dois tipos de dados: *Cross-section* para os municípios no ano

de 2017 e Painel para os estados de 2009 a 2018. Especificamente, buscamos encontrar relações do tipo³:

$$\ln D = \beta_0 + \beta_1 \ln k + \beta_2 \ln N + \beta_3 X + \tilde{u} \quad (32)$$

Em que D é o desmatamento, que tem as queimadas como componente, k o custo do desmatamento, representado pelas multas, N o número de fazendeiros e X são outras variáveis explicativas. Dessa forma, não apenas poderemos verificar o sinal dos efeitos de essas variáveis explicativas, mas também a sua intensidade.

Figura 7: Focos de queimada por tipo de propriedade rural do CAR na Amazônia



Fonte: INPE (2021c) /Elaboração própria. (2021)

4.1. Cross-section dos municípios da Amazônia Legal

Selecionamos 90 municípios⁴ dos estados do Acre, Amazonas, Rondônia, Roraima, Mato Grosso, Maranhão, Pará, Tocantins e Amapá que possuíam informações disponíveis sobre área desmatada, focos de queimadas, autos de infração contra a flora, arrecadação em multas e quantidade de estabelecimentos agropecuários para o ano de

³ Linearizando a equação 10 encontramos uma relação similar a (32), como pode ser verificado no APÊNDICE A.

⁴ A lista de municípios está no APÊNDICE B. Os municípios foram selecionados conforme a disponibilidade dos dados, ou seja, apenas os municípios com dados para área desmatada, focos de queimadas, autos de infração contra a flora, arrecadação em multas e quantidade de estabelecimentos agropecuários para o ano de 2017 foram utilizados.

2017. Os dados foram obtidos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e do Censo Agropecuário de 2017, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Buscamos selecionar variáveis que fossem *proxy* para analisar os resultados obtidos na seção 3. Dessa forma avaliamos o sinal e a intensidade do impacto das multas e do número de fazendeiros para as decisões do fazendeiro de queimar o seu terreno. Usamos o modelo (38) para analisar os sinais e efeitos das variáveis de interesse que descrevem a dinâmica das decisões de queimar. Como *proxy* para a área queimada, utilizamos o desmatamento. Avaliamos, primeiramente, com o modelo (37), se os focos de queimadas têm relação com o desmatamento. Os modelos econométricos para a estimação são:

$$\ln Desm = \beta_0 + \beta_1 \ln Focos + \varepsilon \quad (37)$$

$$\ln Y = \beta_0 + \beta_1 \ln X_1 + \beta_2 \ln X_2 + \beta_3 \ln X_3 + \varepsilon \quad (38)$$

As variáveis utilizadas na estimação dos modelos estão descritas na Tabela 1:

Tabela 1 – Descrição das variáveis do modelo *Cross-section*

<i>Variável</i>	<i>Descrição</i>	<i>Ano</i>	<i>Fonte</i>
<i>Desm</i>	Área desmatada (em km ²)	2017	INPE
<i>Focos</i>	Focos de queimada ativos detectados por satélite	2017	INPE
<i>Y</i>	Área desmatada como fração da área do município	2017	IBGE
<i>X₁</i>	Valor dos autos de infração total como fração do PIB do município	2017	IBGE
<i>X₂</i>	Arrecadação em multas total como fração do PIB do município	2017	IBGE
<i>X₃</i>	Número de estabelecimentos agropecuários	2017	IBGE

Fonte: Elaboração própria. (2021)

O sinal esperado do coeficiente de regressão para o modelo (37) é $\beta_1 > 0$. Isso significa que os focos de queimadas teriam uma relação positiva com o desmatamento, sendo uma das variáveis que impactam na perda florestal. Já para o modelo (38), esperamos que os sinais dos coeficientes de regressão sejam $\beta_1 < 0$, $\beta_2 < 0$, $\beta_3 > 0$. Como os coeficientes β_1 e β_2 estão associados às multas, espera-se que tenham um impacto na redução do desmatamento. Quanto maior o número de fazendeiros, a área

desmatada também deve aumentar, pois haveria mais produção e em consequência, uma maior fração de terra a ser utilizada.

As estatísticas descritivas das variáveis estão na Tabela 1. Também reportamos as estatísticas descritivas do logaritmo dessas variáveis na Tabela 2, pois os modelos estimados são duplo-log. Percebemos que a média de focos apresenta um valor considerável e desvio-padrão alto, indicando que as queimadas ocorrem de maneira desigual entre os municípios. O número de estabelecimentos agropecuários também tem um desvio padrão alto, sendo a quantidade de estabelecimentos também desigual a nível de município.

Tabela 2 – Estatísticas descritivas das variáveis do modelo *Cross-section*

<i>Variável</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio-padrão</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
<i>Desm</i>	32,72844	63,70727	0,02	346,81
<i>Focos</i>	3424,222	7222,25	21	52050
<i>Y</i>	0,0026343	0,0043267	0,0000158	0,0222493
<i>X₁</i>	0,0002616	0,0009043	3,88E-08	0,0053296
<i>X₂</i>	0,0001674	0,0002473	0,000000483	0,001364
<i>X₃</i>	1832,578	1565,151	211	9410

Fonte: Elaboração própria. (2021)

Tabela 3 – Estatísticas descritivas dos logaritmos das variáveis do modelo *Cross-section*

<i>Variável</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio-padrão</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
<i>lDesm</i>	1,680854	2,205001	-3,912023	5,848777
<i>lFocos</i>	6,856304	1,729348	3,044523	10,85996
<i>lY</i>	-6,953586	1,571422	-11,0524	-3,805444
<i>lX₁</i>	-11,16325	2,279194	-17,06438	-5,23448
<i>lX₂</i>	-9,855453	1,852015	-14,54355	-6,597368
<i>lX₃</i>	7,21594	0,7891511	5,351858	9,149529

Fonte: Elaboração própria. (2021)

O teste de Shapiro-Wilk para a normalidade dos dados está na tabela 4. A hipótese nula indica que a amostra provém de uma distribuição normal e a hipótese alternativa indica que a amostra não tem distribuição normal. As variáveis *lX₁* e *lX₂* têm distribuição normal.

Tabela 4 – Teste de Shapiro-Wilk para a normalidade dos dados *Cross-section*

<i>Variável</i>	<i>Prob>z</i>
<i>IDesm</i>	0,22513
<i>IFocos</i>	0,57415
<i>IY</i>	0,12769
<i>IX₁</i>	0,02382
<i>IX₂</i>	0,01183
<i>IX₃</i>	0,86277

Fonte: Elaboração própria. (2021)

A matriz de correlação das variáveis do modelo (37) indica que há uma correlação positiva e alta entre a variável explicativa e a explicada.

Tabela 5 – Matriz de correlação do desmatamento e das queimadas (1)

	<i>IDesm</i>	<i>IFocos</i>
<i>IDesm</i>	1	
<i>IFocos</i>	0,7234	1

Fonte: Elaboração própria. (2021)

No modelo (38), como mostra a tabela 6, as variáveis têm correlação entre si, mas não são tão correlacionadas com o desmatamento quanto os focos de queimadas. É possível perceber uma correlação negativa entre o valor das multas e da arrecadação com o número de estabelecimentos agropecuários, uma possível explicação é que quanto maior a quantidade de estabelecimentos, mais difícil seria manter a fiscalização.

Tabela 6 – Matriz de correlação do desmatamento e variáveis explicativas (1)

	<i>IY</i>	<i>IX₁</i>	<i>IX₂</i>	<i>IX₃</i>
<i>IY</i>	1			
<i>IX₁</i>	0,0386	1		
<i>IX₂</i>	0,3056	0,3625	1	
<i>IX₃</i>	0,3293	-0,2908	-0,0236	1

Fonte: Elaboração própria. (2021)

4.2. Resultados e discussão do modelo com dados *Cross-section*

A regressão do modelo (37) na tabela 7, entre o desmatamento e os focos de queimadas, mostra como boa parte das queimadas tem implicação com o aumento da área

desmatada. Nesse caso, se considerarmos a agricultura de corte e queima, uma parte do desmatamento ocorre por causa das queimadas para preparar a terra. No caso da regressão (37), o aumento de 1% nos focos de queimadas gera um aumento de 0,92% no desmatamento. Dessa forma, para analisar o impacto da política ambiental, representada pelas multas, usaremos como variável explicada a área desmatada.

Tabela 7 – Regressão entre desmatamento e focos de queimadas (1)

<i>Variável explicativas</i>	<i>Variável dependente</i>
	<i>IDesm</i>
<i>IFocos</i>	0,922*** (0,0938)
<i>Constante</i>	-4,643*** (0,663)
<i>Observações</i>	90
<i>R-quadrado</i>	0,523
<i>R-quadrado ajustado</i>	0,518
<i>F</i>	96,6
<i>P</i>	8,09E-16
<i>MSQ</i>	226,4

Nota: Erro-padrão entre os parênteses. * p < 0,10, ** p < 0,05, *** p < 0,01.
Fonte: Elaboração própria. (2021)

A análise da variância do modelo (37) está na Tabela 8, em que gl são os graus de liberdade, SQ é a soma dos quadrados, MQ é a média dos quadrados e F é o teste F. O teste indica que a variável do modelo tem uma boa capacidade de explicação deste.

Tabela 8 – ANOVA do desmatamento e das queimadas

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Prob>F</i>
Regressão	1	226,441	226,441	96,6	0,0000
Resíduo	88	206,28	2,34409		
Total	89	432,721			

Fonte: Elaboração própria. (2021)

O teste escolhido para a normalidade dos resíduos foi o de Skewness/Kurtosis, na Tabela 9. Testa-se a hipótese nula de que o erro segue uma distribuição normal contra a hipótese alternativa de que não segue. O resultado do teste indica que se deve aceitar a hipótese nula. Os resíduos são normalmente distribuídos, logo, a variável do modelo é confiável.

Tabela 9 – Teste de Skewness/Kurtosis do desmatamento e das queimadas (1)

<i>Variável</i>	<i>prob>X²</i>
<i>Resíduo</i>	0,05

Fonte: Elaboração própria. (2021)

Dessa forma, podemos prosseguir para a regressão do modelo (38), já que as queimadas têm relação com o desmatamento. Os resultados da regressão do modelo (38) estão na Tabela 10. A significância aumenta quando o número de variáveis aumenta, porém, a primeira variável é sempre não significativa. Uma possível causa para o valor das multas não ser significativo pode ser devido as baixo valor ou a falta de uma fiscalização eficiente para sua aplicação. Isso vai em consonância com o trabalho de Anderson et al. (2019), que examinaram as concessões de forma privada na Amazônia Peruana para determinar se a governança ambiental privada por meio de compromissos com a sustentabilidade está associada a uma menor taxa de desmatamento em comparação com concessões sem compromissos de sustentabilidade e, inversamente, se a governança ambiental pública através das multas influencia as taxas de desmatamento mais elevadas comparadas com concessões sem multas. Não foram encontrados resultados estatisticamente significativos, no estudo deles, ligando quaisquer compromissos ou multas para mudar as taxas de desmatamento na Amazônia Peruana. No caso dos compromissos com a sustentabilidade, isso pode ser devido ao monitoramento não adequado. No caso das multas pode resultar que não muito pequenas e não adequadamente aplicados para obter a conformidade legal.

A arrecadação ser positiva e significativa se deve em parte também a uma fiscalização precária e a um baixo valor. O valor da multa não sendo efetivo para reduzir o desmatamento pode levar o fazendeiro a desmatar, pagar a multa e continuar desmatando. O número de estabelecimentos é significativo e positivo. Ele indica que um aumento de 1% no número de estabelecimentos acarreta um aumento de 0,687% na área desmatada relativa ao tamanho do estado.

Tabela 10 – Regressão entre o desmatamento e as variáveis explicativas (1)

<i>Variáveis explicativas</i>	<i>Variável dependente</i>		
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
	<i>IDesm</i>	<i>IDesm</i>	<i>IDesm</i>
<i>lX₁</i>	0,0266 (0,0734)	-0,0573 (0,0753)	0,0199 (0,0745)
<i>lX₂</i>		0,285*** (0,0926)	0,257*** (0,0878)
<i>lX₃</i>			0,687*** (0,201)
<i>Constante</i>	-6,657*** (0,837)	-4,786*** (1,004)	-9,151*** (1,589)
<i>Observações</i>	90	90	90
<i>R-quadrado</i>	0,0015	0,0994	0,207
<i>R-quadrado ajustado</i>	-0,0099	0,0787	0,18
<i>F</i>	0,131	4,802	7,5
<i>P</i>	0,718	0,0105	0,0002
<i>MSQ</i>	0,327	21,85	45,58

Nota: Erro-padrão entre os parênteses. * p < 0,10, ** p < 0,05, *** p < 0,01.

Fonte: Elaboração própria. (2021)

A análise da variância do modelo (38) está na Tabela 11. O teste indica que as variáveis têm uma boa capacidade de explicação deste. O teste de Skewness/Kurtosis na Tabela 12 mostra que se deve aceitar a hipótese nula, logo os resíduos são normalmente distribuídos e, em consequência, as variáveis do modelo são confiáveis.

Tabela 11 – ANOVA do desmatamento e variáveis explicativas

	<i>Gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Prob>F</i>
<i>Regressão</i>	3	45,5759	15,192	7,5	0,0002
<i>Resíduo</i>	86	174,198	2,02556		
<i>Total</i>	89	219,774			

Fonte: Elaboração própria. (2021)

Tabela 12 – Teste de Skewness/Kurtosis do desmatamento e variáveis explicativas (1)

<i>Variável</i>	<i>prob>X²</i>
<i>Resíduo</i>	0,6634

Fonte: Elaboração própria. (2021)

4.3. Dados em Painel para os estados da Amazônia Legal

Para avaliar o comportamento das variáveis que definem estrategicamente o desmatamento por queimadas, estimamos um modelo com dados em um painel balanceado para os estados da Amazônia Legal. Foram selecionados 8 estados no período de 2009 a 2018⁵. Os estados selecionados foram: Amazônia, Amapá, Roraima, Rondônia, Tocantins, Pará, Maranhão e Mato Grosso. Os dados foram organizados em painel com estimador de primeira diferença⁶. As informações selecionadas também foram de focos de queimadas, autos de infração contra a flora e o PIB per capita como *proxy* do número de fazendeiros, partindo do pressuposto de que quanto maior a quantidade de fazendeiros em uma localidade, maior a produção, já que a atividade corresponde mais à economia competitiva. Nesse caso, fez-se per capita para eliminar o efeito tamanho.

Além disso há a inserção da variável de toneladas de mandioca, dado que essa cultura é uma das responsáveis pelas queimadas relacionadas à agricultura de corte e queima, devido também à sua importância econômica. (FONSECA-MORELLO et al., 2017)

Os dados foram obtidos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Em um primeiro momento, avaliamos, com o modelo (39), se os focos de queimadas têm relação com o desmatamento. Em seguida, verificamos o impacto e analisamos como se comportam as outras variáveis que compõem o desmatamento. Os modelos econométricos para a estimação são:

Estimamos os modelos (39) e (40):

$$\ln Desm = \beta_0 + \beta_1 \ln Focos + \varepsilon \quad (39)$$

$$\ln Y = \beta_0 + \beta_1 \ln X_1 + \beta_2 \ln X_2 + \beta_3 \ln X_3 + \beta_4 \ln X_4 + \varepsilon \quad (40)$$

A descrição das variáveis está na Tabela 13. As estatísticas descritivas das variáveis e de seus logaritmos estão nas Tabelas 14 e 15, respectivamente. O desvio-

⁵ Os dados para o valor dos autos de infração do estado do Acre no ano de 2013 eram inexistentes, então o Acre não foi incluído na amostra.

⁶ Os modelos de efeitos fixos e efeitos aleatórios apresentaram alguns resultados inconclusivos e com pouca significância estatística. Optou-se pelo uso dos dados em primeira diferença para a análise.

padrão é alto para os focos de queimadas e o desmatamento, o que mostra que há desigualdade da decisão de queimar dos estados. É possível perceber também um desvio padrão alto na quantidade produzida de mandioca, o que indica que os estados têm produção heterogênea no que tange as toneladas de mandioca produzidas.

Tabela 13 – Descrição das variáveis do modelo do Painei

<i>Variável</i>	<i>Descrição</i>	<i>Período</i>	<i>Fonte</i>
Desm	Área desmatada (em km ²)	2009-2018	INPE
Focos	Focos de queimada ativos detectados por satélite	2009-2018	INPE
Y	Área desmatada em razão da área do estado (em km ²)	2009-2018	IBGE
X₁	Valor dos autos de infração em razão do PIB do estado	2009-2018	IBGE
X₂	Arrecadação em multas total em razão do PIB do estado	2009-2018	IBGE
X₃	Quantidade produzida de mandioca do estado (em toneladas)	2009-2018	IBGE
X₄	PIB per capita do estado	2009-2018	IBGE

Fonte: Elaboração própria. (2021)

Tabela 14 – Estatísticas descritivas das variáveis em Painei

<i>Variável</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio-padrão</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
Desm	724,068	828,2985	12,18	3558,44
Focos	15652,9	13535	1000	59013
Y	0,00119	0,0012243	0,0000831	0,00538
X₁	0,05276	0,0444125	0,0045966	0,28359
X₂	0,52117	1,458635	9,91E-06	11,8258
X₃	1017341	1388385	77119	4914831
X₄	13,3765	8,049702	3,994733	48,2113

Fonte: Elaboração própria. (2021)

Tabela 15 – Estatísticas descritivas dos logaritmos em Painei

<i>Variável</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio-padrão</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
<i>IDesm</i>	5,71702	1,55566	2,49980	8,17708
<i>IFocos</i>	9,18494	1,09988	6,90776	10,98551
<i>IY</i>	-7,25944	1,09698	-9,39536	-5,22578
<i>IX₁</i>	-3,24135	0,81217	-5,38245	-1,26022
<i>IX₂</i>	-2,30497	2,10816	-11,52164	2,47028
<i>IX₃</i>	13,12016	1,17285	11,25311	15,40777
<i>IX₄</i>	2,45458	0,51069	1,38498	3,87559

Fonte: Elaboração própria. (2021)

O sinal esperado do coeficiente de regressão para o modelo (39) é $\beta_1 > 0$. Isso significa que, assim como no modelo *Cross-section*, os focos de queimadas teriam uma relação positiva com o desmatamento, impactando positivamente no desmatamento. Já para o modelo (40), esperamos que os sinais dos coeficientes de regressão sejam $\beta_1 < 0$, $\beta_2 < 0$, $\beta_3 > 0$ e $\beta_4 > 0$. Como os coeficientes β_1 e β_2 estão associados às multas, espera-se também que tenham um impacto na redução do desmatamento. Quanto maior o PIB per capita, como proxy para o número de fazendeiros, espera-se que haja um efeito positivo no desmatamento, assim como a quantidade de mandioca produzida, já que um aumento na produção acarretaria também uma necessidade maior de desmatar.

A matriz de correlação para as variáveis do modelo (39), descrita na Tabela 16, mostra que existe uma forte correlação positiva entre desmatamento e focos de queimadas, no sentido de que ao longo do tempo, as queimadas continuam a ter o efeito de aumentar o desmatamento, dado que uma maior área queimada pode levar a uma maior perda de cobertura vegetal.

Tabela 16 – Matriz de correlação para o desmatamento e as queimadas (2)

	<i>IDesm</i>	<i>IFocos</i>
<i>IDesm</i>	1	
<i>IFocos</i>	0,6426	1

Fonte: Elaboração própria. (2021)

A matriz de correlação das variáveis do modelo (40), na Tabela 17, nos mostra que a relação entre as multas e a produção de mandioca é negativa. Isso pode ser explicado pelo fato de as multas serem um tipo de custo para o produtor, sendo que um aumento no custo afeta negativamente a quantidade produzida.

Tabela 17 – Matriz de correlação do desmatamento e variáveis explicativas (2)

	<i>lY</i>	<i>lX₁</i>	<i>lX₂</i>	<i>lX₃</i>	<i>lX₄</i>
<i>lY</i>	1,0000				
<i>lX₁</i>	0,1868	1,0000			
<i>lX₂</i>	-0,0890	0,3367	1,0000		
<i>lX₃</i>	0,4898	-0,1285	-0,0563	1,0000	
<i>lX₄</i>	0,0158	0,1608	-0,4345	-0,2514	1,0000

Fonte: Elaboração própria. (2021)

4.4. Resultados e discussão do modelo com dados em Painel

O modelo (39) foi regredido com o estimador de primeira diferença. Os resultados encontrados estão descritos na Tabela 18. Ao longo do tempo, o efeito das queimadas no desmatamento continua positivo. Se os focos aumentarem em 1%, o desmatamento aumenta 0,617%, sendo os resultados significativos. O R-quadrado é menor, talvez porque com o passar dos anos, outras variáveis têm também relevância na explicação do modelo. Dessa maneira, prosseguiremos a análise utilizando o desmatamento como variável explicativa, dado que as queimadas estão incluídas como determinantes do desmatamento.

Tabela 18 – Regressão do desmatamento e das queimadas (2)

<i>Variável explicativa</i>	<i>Variável dependente</i>
	<i>dlDesm</i>
<i>dlFocos</i>	0,617*** (0,115)
<i>Constante</i>	0,0061 (0,0832)
<i>Observações</i>	79
<i>R-quadrado</i>	0,271
<i>R-quadrado ajustado</i>	0,261
<i>F</i>	28,58
<i>P</i>	0,00000089
<i>MSQ</i>	15,63

Nota: Erro-padrão entre os parênteses. * p < 0,10, ** p < 0,05, *** p < 0,01.

Fonte: Elaboração própria. (2021)

Rejeitou-se a hipótese nula de que os resíduos são normalmente distribuídos, como pode ser visto na Tabela 19. O teste de Breush-Pagan, que testa a

homoscedasticidade dos resíduos, está na Tabela 20. No caso do modelo (39), aceitamos a hipótese nula de que a variância é constante, logo os resultados indicam ausência de heteroscedasticidade para a variável *IDesm*.

Tabela 19 – Teste de Skewness/Kurtosis para o desmatamento e as queimadas (2)

<i>Variável</i>	<i>prob>X²</i>
Resíduo	0,0019

Fonte: Elaboração própria. (2021)

Tabela 20 – Teste de Breush-Pagan para o desmatamento e as queimadas

<i>Variável</i>	<i>prob>X²</i>
Resíduo	0,3391

Fonte: Elaboração própria. (2021)

Com isso, prosseguimos para a regressão do modelo (40), dado que as queimadas têm relação com o desmatamento. O modelo (40) foi regredido com o estimador de primeira diferença. Os resultados estão na Tabela 21. É possível perceber que o R-quadrado aumenta conforme a inserção de novas variáveis ao modelo. De acordo com a regressão, um aumento de 1% no valor dos autos aumenta o desmatamento em 0,0915%, o que vai contra o sinal esperado da variável. Ao longo do tempo, um fator que pode explicar esse resultado, no que tange a fiscalização, é a existência de corrupção entre o órgão do governo e o fazendeiro. Mendes (2011) investigou os efeitos adversos de uma política governamental para conter o desmatamento com a existência de instituições fracas na região Amazônica. Os resultados de seu estudo mostraram que o uso de penalidades (multas), em uma situação na qual há instituições fracas, poderia aumentar o problema da corrupção no setor florestal, levando a um aumento do desmatamento ilegal. Devido à falta de instituições sólidas, a política de autuação para os crimes contra o meio-ambiente pode incentivar a corrupção entre os oficiais do IBAMA e o proprietário. Isso aconteceria porque uma maior penalidade poderia aumentar a corrupção no setor florestal. A evidência internacional aponta, de acordo com ele, que o nível de desmatamento e a corrupção são positivamente correlacionadas. Instituições mais fracas aceitariam mais corrupção e consequentemente, mais desmatamento.

Em comparação com a análise *Cross-section*, no Painel se captura o efeito intertemporal da punição e ela pode ter efeitos na redução do desmatamento. O aumento de 1% na arrecadação, diminui o desmatamento em -0,082%, verificando-se ao longo do

tempo, que a política tem algum efeito nos estados para diminuir o desmatamento, mesmo que a fiscalização seja precária. O efeito é pequeno, pois a arrecadação anual inclui multas atuadas em anos anteriores ou parceladas, o que diminui o seu valor.

A quantidade produzida de mandioca, em toneladas, tem relação positiva com o desmatamento (elasticidade de 0,432), logo verifica-se que quanto maior a produção, maiores impactos ambientais são observados.

Tabela 21 - Regressão entre desmatamento e as variáveis explicativas (2)

<i>Variáveis explicativas</i>	<i>Variável dependente</i>			
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
	<i>dLY</i>	<i>dLY</i>	<i>dLY</i>	<i>dLY</i>
<i>dlX₁</i>	0,0915 (0,0947)	0,101 (0,0952)	0,161* (0,0846)	0,209** (0,0854)
<i>dlX₂</i>		-0,0328 (0,0335)	-0,0458 (0,0295)	-0,0820** (0,0332)
<i>dlX₃</i>			0,460*** (0,095)	0,432*** (0,0936)
<i>dlX₄</i>				-0,375** (0,172)
<i>Constante</i>	-0,000388 0,0764	-0,00261 0,0765	0,000346 0,0672	0,00406 0,0656
<i>Observações</i>	79	79	79	79
<i>R-quadrado</i>	0,012	0,0243	0,257	0,302
<i>R-quadrado ajustado</i>	-0,00085	-0,00133	0,227	0,264
<i>F</i>	0,934	0,948	8,646	7,998
<i>P</i>	0,337	0,392	0,0000533	0,0000205
<i>MSQ</i>	0,431	0,876	9,243	10,86

Nota: Erro-padrão entre os parênteses. * p < 0,10, ** p < 0,05, *** p < 0,01.

Fonte: Elaboração própria. (2021)

O aumento do PIB per capita tem relação com a diminuição do desmatamento. Isso significa que o PIB per capita pode não ser uma boa proxy do número de fazendeiros, mas que o desmatamento no fundo tem um efeito recessivo na economia, pois dinamicamente elas prejudicam o meio-ambiente, de fato, em regiões com meio-ambiente degradado, longos períodos de seca acompanhados de chuva torrencial diminuem a produção local. No estudo de Andrée et al. (2019), analisou-se a relação empírica entre o crescimento econômico e o meio-ambiente usando dados em painel dos indicadores econômicos e dos indicadores de desenvolvimento para um grande grupo de países,

aplicando um modelo de kernel flexível, que permite que as dependências variem sem gerar problemas nos dados. Os resultados deles para o desmatamento que mostraram que os recentes aumentos das densidades populacionais são correlacionados com uma queda do desmatamento, enquanto baixas densidades populacionais são correlacionadas com um aumento do desmatamento. A saída de uma sociedade agrícola e um aumento da parcela dos serviços no PIB seriam altamente correlacionados com a queda nas taxas de desmatamento.

Para o modelo (40), foram feitos os testes de Skewness/Kurtosis para a normalidade dos resíduos na Tabela 22, o teste de Breush-Pagan para a homoscedasticidade dos resíduos na Tabela 23 e o teste de especificação do modelo na tabela 24. Os resultados dos testes indicam que os resíduos não são normalmente distribuídos, mas que não há presença de homoscedasticidade dos resíduos. Observa-se também que aceitamos a hipótese nula de que o modelo não tem variáveis omitidas.

Tabela 22 – Teste de Skewness/Kurtosis para o desmatamento e as variáveis explicativas (2)

<i>Variável</i>	<i>prob>X²</i>
<i>Resíduo</i>	0,00000

Fonte: Elaboração própria. (2021)

Tabela 23 – Teste de Breush-Pagan para o desmatamento e as variáveis explicativas (2)

<i>Variável</i>	<i>prob>X²</i>
<i>Resíduo</i>	0,7684

Fonte: Elaboração própria. (2021)

Tabela 24 – Especificação do modelo

<i>Reset</i>	<i>prob>F</i>
<i>2,47</i>	<i>0,0687</i>

Fonte: Elaboração própria. (2021)

O teste para multicolinearidade retornou um valor de inflação de variância (VIF), que é relativamente pequeno, de 1,23, mostrando não haver multicolinearidade. O *condition number* também se demonstrou pequeno, de 2,22, também mostrando não haver multicolinearidade entre as variáveis.

5. Conclusão

A agropecuária é um setor de destaque no PIB brasileiro, mas que gera externalidades que vão muito além da poluição. Dada a importância desse setor para a Economia Brasileira, torna-se relevante o entendimento das variáveis que podem afetar a perda de cobertura florestal, de modo que ainda ocorra crescimento econômico. Com isso, buscou-se contribuir para um melhor entendimento de como o desmatamento ocorre, de modo que o produtor consiga obter ganhos na produção, sem que isso represente efeitos negativos para o meio-ambiente. Desenvolvemos um jogo agregativo para encontrar o equilíbrio de Nash Interior. Com isso, percebemos que quando há equilíbrio, o aumento do custo, no caso, uma multa, é capaz de reduzir as queimadas e, em consequência, reduzir o desmatamento, melhorando as condições de produção para todos os fazendeiros, já que há uma melhor preservação do meio-ambiente e qualidade dos recursos naturais. A presença do equilíbrio de Nash interior e único leva a um resultado empírico estável, exceto por pequenas informações, além de permitir robustez dos resultados econométricos.

Realizamos também uma análise *cross-section* e uma análise com dados em painel para verificar os resultados encontrados no modelo que desenvolvemos. A presença do equilíbrio de Nash Interior e único no modelo teórico leva a um resultado empírico estável, exceto por pequenas informações. Na análise *cross-section* com os dados para 90 municípios da Amazônia Legal, o aumento de 1% nos focos de queimadas gerou um aumento de 0,92% no desmatamento. Um aumento de 1% no número de estabelecimentos acarreta um aumento de 0,687% na área desmatada relativa ao tamanho do estado. Contudo, o valor dos autos não apresentou resultados significativos. Na análise dos dados em painel para os estados da Amazônia Legal, o efeito das queimadas no desmatamento continua positivo. Se os focos aumentarem em 1%, o desmatamento aumento 0,617%. O aumento de 1% na arrecadação, diminui o desmatamento em -0,082%, mas o efeito é pequeno, pois a arrecadação anual inclui multas autuadas em anos anteriores ou parceladas, o que diminui o seu valor. A quantidade produzida de mandioca, em toneladas, tem elasticidade de 0,432, logo, quanto maior a produção, maiores impactos ambientais são observados.

Analisando a situação para os estados e municípios selecionados da Amazônia Legal, a corrupção e a fiscalização precária, por exemplo, podem fazer com que o efeito esperado das multas no equilíbrio não seja sempre observado, e quando a multa consegue

influenciar negativamente o desmatamento, o efeito é pequeno. Dada a desigualdade do desmatamento observada entre os estados e os municípios da Amazônia Legal, uma política pública ambiental efetiva de combate ao desmatamento deveria, além de considerar essas desigualdades, agir de forma mais eficiente no que tange a fiscalização. Isso é um desafio no Brasil, devido a falta de instituições fortes. Análises posteriores poderiam incluir amostras para vários países, para perceber o efeito das multas na redução das queimadas a nível global, já que a preservação do meio-ambiente em geral afeta não somente a produtividade local, mas também a produtividade no resto do mundo, dado que as mudanças nos ecossistemas levam a mudanças climáticas.

6. Referências

- ANDOR, M. A., SCHMIDT, C.M., SOMMER, S. Climate Change, Population Ageing and Public Spending: Evidence on Individual Preferences. **Ecological Economics**, v. 151, p. 173-183, 2018.
- ANDRÉE, B.P.J., CHAMORRO, A., SPENCER, P., KOOMEN, E., DOGO, H. Revisiting the Relation Between Economic Growth and the Environment; a Global Assessment of Deforestation, Pollution and Carbon Emission. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 114, p. 1-16, 2019.
- BARUA, S. K., UUSIVUORI, J., KUULUVAINEN, J. Impacts of Carbon-based Policy Instruments and Taxes on Tropical Deforestation. **Ecological Economics**, v. 73, p. 211-219, 2012.
- BELGIOIOSO, G., GRAMMATICO, S. On convexity and monotonicity in generalized aggregative games. **IFAC Papers OnLine**, v. 50-1, p. 14338-14343, 2017.
- BRADY, N. C. Alternatives to Slash-and-burn: A Global Imperative. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 58, p. 3-11, 1996.
- CAMMELLI, F., ANGELSEN, A. Amazonian farmers' response to fire policies and climate change. **Ecological Economics**, v.165, p.1-10, 2019.
- COMBES, J. -L., MOTEL, P. C., MINEA, A., VILLIEU, P. Deforestation and seigniorage in developing countries: A trade-off? **Ecological Economics**, v.116, p.220-230, 2015.
- COMBES, J.-L., et al., Public spending, credit and natural capital: Does access to capital foster deforestation? **Economic Modelling**, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2018.04.006>
- CORNES, R., HARTLEY, R. Fully aggregative games. **Economic Letters**, v. 116, p. 631-633, 2011.
- DESBUREAUX, S., BRIMONT, L. Between economic loss and social identity: The multi-dimensional cost of avoiding deforestation in Eastern Madagascar. **Ecological Economics**, v. 118, p. 10-20, 2015.
- FRANKLIN JR., S.L., PINDYCK, R. S. Tropical Forests, Tipping Points, and the Social Cost of Deforestation. **Ecological Economics**, v. 135, p. 161-171, 2018.
- FREDJ, K., MARTÍN-HERRÁN, G., ZACCOUR, G. Slowing deforestation pace through subsidies: a differential game., v. 40, n. 2, p. 301–309, 2004.
- FONSECA-MORELLO, T., RAMOS, R., STEIL, L., PARRY, L., BARLOW, J., MARKUSSON, N., FERREIRA, A. Fires in Brazilian Amazon: why does policy have a limited impact? **Ambiente e Sociedade**, v. 20, n. 4, p. 19-38, 2017.

GOSWAMI, K., CHOUDHURY, H. K., SAIKIA, J. Factors Influencing Farmers' Adoption of Slash and Burn Agriculture in North East India. **Forest Policy and Economics**, v. 15, p. 146-151, 2012.

HARDIN, G. The Tragedy of the Commons. **Science**, v. 162 (3859), p. 1243-1248, 1968.

HASSON, R., LÖFGREN, A., VISSER, M. Climate change in a public goods game: Investment decision in mitigation versus adaptation. **Ecological Economics**, v.70(2), p. 331-338, 2010.

IBGE. Amazônia Legal. 2021. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia/15819-amazonia-legal.html?=&t=o-que>>. Acesso em: 27 jan. 2021.

INPE (2021a). INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. COORDENAÇÃO GERAL DE OBSERVAÇÃO DA TERRA. Desmatamento – Amazônia Legal. Disponível em: <http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/dashboard/deforestation/biomes/legal_amazon/rates>. Acesso em: 27 jan. 2021.

INPE (2021b). INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. COORDENAÇÃO GERAL DE OBSERVAÇÃO DA TERRA. Queimadas. Disponível em: <https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal-static/estatisticas_estados/>. Acesso em: 27 jan. 2021.

INPE (2021c). INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. COORDENAÇÃO GERAL DE OBSERVAÇÃO DA TERRA. Queimadas – Amazônia Legal. Disponível em: <<http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/dashboard/fires/legal/amazon/aggregated>>. Acesso em: 27 jan. 2021

JUNG, S., POLASKY, S., Partnerships to prevent deforestation in the Amazon, **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 92, pp. 498-516. 2018.

JÚNIOR, N. N. P., MURRIETA, R. S. S., ADAMS, C. A agricultura de Corte e Queima: Um Sistema em Transformação. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas**, v. 3, n.2, p. 153-174, 2008.

KUMAR, P., KUMAR, S., JOSHI, L. Socioeconomic and Environmental Implications of Agricultural Residue Burning: A Case Study of Punjab, India. Springer: Nova Déli, 2015.

LLOYD, B. The Commons revisited: The tragedy continues. **Energy Policy**, 35(11), p. 5806–5818, 2007.

LU, C., YANG, C., YEN, H. Stackelberg game approach for sustainable production-inventory model with collaborative investment in technology for reducing carbon emissions. **Journal of Cleaner Production**, v. 270, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121963>

MAMMADOVA, A., BEHAGEL, J., MASIERO, M. Making deforestation risk visible. Discourses on bovine leather supply chain in Brazil. **Geoforum**, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2020.03.008>

MARTIMORT, D., STOLE, L. Representing equilibrium aggregates in aggregate games with applications to common agency. **Games and Economic Behavior**, v. 76, p. 753-772, 2012.

MARTÍN-HERRÁN, G., CARTIGNY, P., MOTTE, E., TIDBALL, M. Deforestation and foreign transfers: a Stackelberg differential game approach. **Computers & Operations Research**, v. 33(2), p. 386-400, 2006.

MENDES, C. M. V. **Ensaio sobre o desmatamento: corrupção, jogos diferenciais, e evidência empírica**. 2011. 124 f. Tese (Doutorado em Economia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MELLO, N. G. R. **Análise dos Fatores Responsáveis pela Redução de Desmatamento na Amazônia Legal entre os anos de 2005 e 2013**. 2015. 121 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambiental). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

MOLINA, J.R., HERRERA, M.A., RODRÍGUES Y SILVA, F. Wildfire-induced reduction in the carbon storage of Mediterranean ecosystems: An application to brush and forest fires impacts assessment. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 76, p. 88-97, 2019.

MORELLO, T.F., RAMOS, R.M., ANDERSON, L.O., OWEN, N., ROSAN, T. M., STEIL, L. Predicting Fires for Policy Making: Improving Accuracy of Fire Brigade Allocation in the Brazilian Amazon. **Ecological Economics**, v. 169, p. 1-14, 2020.

MÜLLER-HANSEN, F., HEITZIG, J., DONGES, J. F., CARDOSO, M. F., DALLA-NORA, E. L., ANDRADE, P., KURTHS, J., THONICKE, K. Can Intensification of Cattle Ranching Reduce Deforestation in the Amazon? Insights from an Agent-based Social-Ecological Model. **Ecological Economics**, v. 159, p. 198-211, 2019.

PANT, K. P. Uniform-Price Reverse Auction for Estimating the Costs of Reducing Open-Field Burning of Rice Residue in Nepal. **Environmental and Resource Economics**, v. 62, p. 567-581, 2015.

REUTERS. **Exclusive: European investors threaten Brazil divestment over deforestation**. Disponível em: <https://www.reuters.com/article/us-brazil-environment-divestment-exclusi/exclusive-european-investors-threaten-brazil-divestment-over-deforestation-idUSKBN23Q1MU>. Acesso em: 19 de jun. 2020

REYDON, B.P., FERNANDES, V.B., TELLES, T.S. Land governance as a precondition for decreasing deforestation in the Brazilian Amazon. **Land Use Policy**, v. 94, p. 1-13, 2020.

RODRIGUES, A.; KOEPPL, H., OHTSUKI, H., SATAKE, A. A game theoretical model of deforestation on human-environment relationships. **Journal of Theoretical Biology**, v. 258(1), p. 127-134, 2009.

SANTIAGO, A. R. C., COUTO, H.T.Z. Socioeconomic development versus deforestation: considerations on the sustainability of economic and social growth in most Brazilian municipalities. **Environmental Development**, v. 35, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2020.100520>

SEIDL, A. F., SILVA, J. S. V., MORAES, A. S. Cattle ranching and deforestation in the Brazilian Pantanal. **Ecological Economics**, v. 36(3), p. 413-425, 2001.

SILVA, R. O., BARIONI, L. G., MORAN, D. Fire, deforestation, and livestock: When the smoke clears. **Land Use Policy**, v. 100. 2021. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104949>

SCHUCK, E.C., NGANJE, W., YANTIO, D. The Role of Land Tenure and Extension Education in the Adoption of Slash and Burn Agriculture. **Ecological Economics**, v. 43(1), p. 61-70, 2002.

STABILE, M. C. C., GUIMARÃES, A. L., SILVA, D. S., RIBEIRO, MACEDO, M. N., COE, M. T., PINTO, E., MOUTINHO, P., ALENCAR, A. Solving Brazil's Land Use Puzzle: Increasing Production and Slowing Amazon Deforestation. **Land Use Policy**, v. 91. 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104362>

APÊNDICE A

Reorganizando os termos da equação (10) da seção 3, sabendo que $\varepsilon(D) = \frac{D}{A(D)} A'(D)$, e que pela proposição 4 e o Caso II podemos escrever $\alpha_n t_n = \frac{D}{N}$, obtemos:

$$\begin{aligned} A(D) \left[\left(\frac{\alpha_n t_n}{D} \right) \varepsilon(D) + \rho \right] &= k_n (\alpha_n t_n)^{1-\rho} \\ A(D) \left[\left(\frac{D}{N} \frac{1}{D} \right) \frac{D}{A(D)} A'(D) + \rho \right] &= k_n \left(\frac{D}{N} \right)^{1-\rho} \\ \left[\left(\frac{D}{N} \right) A'(D) + A(D) \rho \right] &= k_n \left(\frac{D}{N} \right)^{1-\rho} \end{aligned} \quad (A.1)$$

Da equação (A.1) concluímos que a variável endógena D depende das exógenas k_n (custos de desmatar/preparar a terra), N (número de fazendeiros e elasticidade de produção da terra. Dessa forma podemos escrever:

$$D = f(k_n, N) \Rightarrow \exp\{\ln(D)\} = f(\exp\{\ln(k_n)\}, \exp\{\ln(N)\})$$

Fazendo a aproximação linear da equação acima resulta:

$$\ln(D) = \beta_0 + \beta_1 \ln(k_n) + \beta_2 \ln(N)$$

Em que os sinais dos coeficientes acima deveriam seguir aqueles propostos pelo modelo teórico. Como de costume, devem ser agregadas outras variáveis explicativas que permitam um melhor ajuste e significância do modelo.

APÊNDICE B

Lista de municípios selecionados da Amazônia Legal utilizados na análise *Cross-Section*, incluindo *geocode* do IBGE.

geocode_ibge	Município
1100015	Alta Floresta D'Oeste (RO)
1100379	Alto Alegre dos Parecis (RO)
1100346	Alvorada D'Oeste (RO)
1100452	Buritis (RO)
1100049	Cacoal (RO)
1100700	Campo Novo de Rondônia (RO)
1100908	Castanheiras (RO)
1100064	Colorado do Oeste (RO)
1100940	Cujubim (RO)
1100098	Espigão D'Oeste (RO)
1100122	Ji-Paraná (RO)
1100130	Machadinho D'Oeste (RO)
1101203	Ministro Andreazza (RO)
1100338	Nova Mamoré (RO)
1101435	Nova União (RO)
1100155	Ouro Preto do Oeste (RO)
1100189	Pimenta Bueno (RO)
1100205	Porto Velho (RO)
1100254	Presidente Médici (RO)
1100288	Rolim de Moura (RO)
1101500	Seringueiras (RO)
1101559	Teixeirópolis (RO)
1101708	Urupá (RO)
1100304	Vilhena (RO)
1200401	Rio Branco (AC)
1200427	Rodrigues Alves (AC)
1200450	Senador Guiomard (AC)
1200500	Sena Madureira (AC)
1300201	Atalaia do Norte (AM)
1300508	Barreirinha (AM)
1300706	Boca do Acre (AM)
1301704	Humaitá (AM)
1301852	Irlanduba (AM)
1302405	Lábrea (AM)
1302603	Manaus (AM)
1302702	Manicoré (AM)
1303304	Novo Aripuanã (AM)
1400175	Cantá (RR)
1400209	Caracaraí (RR)
1400472	Rorainópolis (RR)
1500107	Abaetetuba (PA)
1500602	Altamira (PA)
1501303	Barcarena (PA)
1501402	Belém (PA)
1501501	Benevides (PA)
1503606	Itaituba (PA)
1504208	Marabá (PA)
1505031	Novo Progresso (PA)
1505304	Oriximiná (PA)

1505502	Paragominas (PA)
1505536	Parauapebas (PA)
1506351	Santa Bárbara do Pará (PA)
1506708	Santana do Araguaia (PA)
1506807	Santarém (PA)
1507151	São Domingos do Araguaia (PA)
1507300	São Félix do Xingu (PA)
1507508	São João do Araguaia (PA)
1507953	Tailândia (PA)
1600204	Calçoene (AP)
1600279	Laranjal do Jari (AP)
1600303	Macapá (AP)
1600501	Oiapoque (AP)
1600535	Porto Grande (AP)
1600600	Santana (AP)
1703909	Caseara (TO)
1707108	Divinópolis do Tocantins (TO)
1707306	Duere (TO)
1709302	Guarai (TO)
1716653	Pequizeiro (TO)
1718899	Santa Rita do Tocantins (TO)
1722081	Wanderlândia (TO)
1722107	Xambioá (TO)
2100600	Amarante do Maranhão (MA)
2105302	Imperatriz (MA)
2109601	Rosário (MA)
2111029	São João do Carú (MA)
2111300	São Luís (MA)
2112852	Vila Nova dos Martinhos (MA)
5101407	Aripuanã (MT)
5101902	Brasnorte (MT)
5103056	Cláudia (MT)
5103254	Colniza (MT)
5103700	Feliz Natal (MT)
5104104	Guarantã do Norte (MT)
5105150	Juina (MT)
5105176	Juruena (MT)
5107800	Santo Antônio do Leverger (MT)
5107909	Sinop (MT)
5107925	Sorriso (MT)
5108303	União do Sul (MT)