



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB
FACULDADE DE PLANALTINA - FUB
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

EDUARDO LUIZ DE SOUSA SOARES

**Análise da Efetividade dos Embargos para o Cumprimento do Código Florestal na
Amazônia Brasileira por meio do Algoritmo de Segmentação Temporal de
Imagens de Satélite *LandTrendr***

Brasília

2024

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB
FACULDADE DE PLANALTINA - FUB
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

EDUARDO LUIZ DE SOUSA SOARES

**Análise da Efetividade dos Embargos para o Cumprimento do Código Florestal na
Amazônia Brasileira por meio do Algoritmo de Segmentação Temporal de
Imagens de Satélite *LandTrendr***

Dissertação apresentada como requisito para
obtenção do título de Mestre em Ciências
Ambientais no Programa de Pós-Graduação
em Ciências Ambientais da Faculdade UnB
Planaltina, Universidade de Brasília.

Orientador: Prof. Dr. Edson Eyji Sano

Brasília

2024

Eduardo Luiz de Sousa Soares

Dissertação de Mestrado

**Análise da Efetividade dos Embargos para o Cumprimento do Código Florestal na
Amazônia Brasileira por meio do Algoritmo de Segmentação Temporal de
Imagens de Satélite *LandTrendr***

Banca Examinadora

Prof. Dr. Edson Eyji Sano

Embrapa

Orientador

Prof. Dra. Tati de Almeida

Universidade de Brasília (UnB)

Examinadora interna

Dra. Marina de Fátima Vilela

Embrapa

Examinadora externa

Brasília

2024

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S676a Soares, Eduardo Luiz de Sousa
Análise da Efetividade dos Embargos para o Cumprimento do Código Florestal na Amazônia Brasileira por meio do Algoritmo de Segmentação Temporal de Imagens de Satélite LandTrendr / Eduardo Luiz de Sousa Soares; orientador Edson Eyji Sano. -- Brasília, 2024.
113 p.

Dissertação(Mestrado em Ciências Ambientais) --
Universidade de Brasília, 2024.

1. Restauração florestal. 2. Amazônia Legal. 3. Fiscalização ambiental. 4. Sensoriamento remoto. 5. Google Earth Engine. I. Sano, Edson Eyji, orient. II. Título.

RESUMO

A Floresta Amazônica possui ecossistemas diversos abrigando grande biodiversidade e contribuindo para a manutenção de processos ecossistêmicos. Entretanto, na medida em que a degradação florestal aumenta, a estrutura, função, composição das espécies e produtividade da floresta são severamente modificadas. O governo brasileiro tem estabelecido diversos mecanismos para diminuir a degradação florestal e propiciar sua regeneração, destacando-se o monitoramento e fiscalização ambiental, a implementação de políticas públicas para a região e a utilização de tecnologias geoespaciais. Nesta dissertação, foi abordada a seguinte questão científica: o aplicativo de interface gráfica do usuário *LandTrendr Pixel Time Series Plotter*, que realiza análises de séries temporais do algoritmo *Landsat-based Detection of Trends in Disturbance and Recovery* (LandTrendr) na plataforma Google Earth Engine (LT-GEE), é adequado para monitorar a restauração da vegetação nativa desmatada e degradada na Amazônia brasileira? O objetivo deste estudo é analisar a efetividade do aplicativo *LandTrendr Pixel Time Series Plotter* para verificar a regeneração da vegetação nativa em áreas embargadas pelo Ibama na Amazônia brasileira. O escopo espacial é o município de Altamira, Pará, onde foram selecionadas 50 áreas embargadas pelo Ibama e inseridas em terras indígenas, terras quilombolas, unidades de conservação, assentamentos rurais, propriedades privadas e glebas públicas sem destinação. O espaço temporal compreendeu o período de 1998 a 2021. O algoritmo LT-GEE foi aplicado às series temporais do NDVI, disponíveis na plataforma SATVeg da Embrapa Agricultura Digital, em Campinas, SP. O estudo demonstrou que no período houve mais perda de vegetação nativa do que ganho com regeneração em todas as categorias fundiárias. Houve mais amostras com perda de vegetação localizadas em glebas públicas não destinadas, e mais amostras com regeneração localizadas em unidades de conservação. Das 50 amostras selecionadas, 43 tiveram resultados semelhantes, enquanto as outras sete apresentaram resultados distintos. Foi realizado também um estudo de caso, para demonstrar o potencial de utilização da ferramenta para o monitoramento ambiental no Brasil. Os resultados demonstraram que o aplicativo *UI LandTrendr Pixel Time Series Plotter* é um instrumento eficaz para detectar a regeneração da vegetação em áreas embargadas pelo Ibama e em áreas em regeneração na floresta amazônica.

Palavras-chave: Restauração florestal; Amazônia Legal; fiscalização ambiental; sensoriamento remoto; Google Earth Engine.

ABSTRACT

The Amazon rainforest has diverse ecosystems, harboring great biodiversity and contributing to the maintenance of ecosystem processes. However, as forest degradation increases, the structure, function, species composition and productivity of the forest are severely modified. The Brazilian government has established various mechanisms to reduce forest degradation and promote its regeneration, including environmental monitoring and inspection, the implementation of public policies for the region and the use of geospatial technologies. This dissertation addresses the following scientific question: Is the *LandTrendr Pixel Time Series Plotter* graphical user interface application, which analyzes time series from the *Landsat-based Detection of Trends in Disturbance and Recovery* (LandTrendr) algorithm on the Google Earth Engine (LT-GEE) platform, suitable for monitoring the restoration of deforested and degraded native vegetation in the Brazilian Amazon? The aim of this study is to analyze the effectiveness of the *LandTrendr Pixel Time Series Plotter* application for verifying the regeneration of native vegetation in areas embargoed by Ibama in the Brazilian Amazon. The spatial scope is the municipality of Altamira, Pará, where 50 areas embargoed by Ibama and included in indigenous lands, quilombola lands, conservation units, rural settlements, private properties and public land without a destination were selected. The time frame covered the period from 1998 to 2021. The LT-GEE algorithm was applied to the NDVI time series available on Embrapa Digital Agriculture's SATVeg platform in Campinas, SP. The study showed that in the period there was more loss of native vegetation than gain from regeneration in all land ownership categories. There were more samples with vegetation loss located on unallocated public land, and more samples with regeneration located in conservation units. Of the 50 samples selected, 43 had similar results, while the other seven showed different results. A case study was also carried out to demonstrate the tool's potential for use in environmental monitoring in Brazil. The results showed that the *UI LandTrendr Pixel Time Series Plotter* application is an effective tool for detecting vegetation regeneration in areas embargoed by Ibama and in areas undergoing regeneration in the Amazon rainforest.

Keywords: Forest restoration; Legal Amazon; environmental monitoring; remote sensing; Google Earth Engine.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Registro histórico de um pixel..	44
Figura 2.2. Processo de segmentação do LandTrendr.....	46
Figura 2.3. Segmentação da série temporal de um pixel.....	47
Figura 2.4. Resultados do algoritmo LandTrendr em um território no estado de Oregon, nos Estados Unidos, em que ocorreram perturbações por processos naturais e antropogênicos.....	47
Figura 2.5. Interface do <i>UI LandTrendr Pixel Time Series Plotter</i>	51
Figura 2.6. Interface da plataforma SATveg.....	53
Figura 2.7. Gráfico da plataforma SATveg.....	54
Figura 2.8. Biblioteca de padrões espectrais da plataforma SATveg.....	55
Figura 3.1. Mapa de localização da área de estudo, o município de Altamira, no estado do Pará.....	57
Figura 3.2. Municípios da Amazônia Legal com os maiores incrementos de desmatamento acumulado (km ²) no período 2008–2023.....	59
Figura 3.3. Número de áreas embargadas pelo Ibama no município de Altamira, Pará, no período de 2003 a 2021.....	59
Figura 3.4. Distribuição espacial de áreas embargadas pelo Ibama no município de Altamira, Pará, no período 2003-2021.....	60
Figura 3.5. Localização das áreas embargadas pelo Ibama para amostra.....	61
Figura 3.6. Amostras por tipo fundiário no município de Altamira, no estado do Pará.....	63
Figura 3.7. Distribuição das amostras por tipo fundiário.....	64
Figura 3.8. Vértice de mudança na curva espectro-temporal detectado pelo algoritmo <i>UI Application LandTrendr Pixel Time Series Plotter</i> , indicando possível desmatamento.....	65
Figura 4.1. Padrão temporal do NDVI para a Amostra 1 na plataforma do SATVeg... 66	66
Figura 4.2. Série temporal do uso e cobertura da terra para do MapBiomias para a Amostra 1.....	67
Figura 4.3. Padrão temporal do NDVI para a Amostra 1 obtido pelo algoritmo LT-GEE.....	67

Figura 4.4. Padrões temporais de NDVI para Amostra 3 na plataforma SATVeg (A) e os correspondentes resultados produzidos pelo algoritmo LT-GEE (B) e pelos dados da série temporal do MapBiomias (C).	69
Figura 4.5. Padrões temporais de NDVI para Amostra 4 na plataforma SATVeg (A) e os correspondentes resultados produzidos pelo algoritmo LT-GEE (B) e pelos dados da série temporal do MapBiomias (C).	70
Figura 4.6. Padrões temporais de NDVI para Amostra 5 na plataforma SATVeg (A) e os correspondentes resultados produzidos pelo algoritmo LT-GEE (B) e pelos dados da série temporal do MapBiomias (C).	71
Figura 4.7. Padrões temporais de NDVI para Amostra 18 na plataforma SATVeg (A) e os correspondentes resultados produzidos pelo algoritmo LT-GEE (B) e pelos dados da série temporal do MapBiomias (C).	72
Figura 4.8. Padrões temporais de NDVI para Amostra 7 na plataforma SATVeg (A) e os correspondentes resultados produzidos pelo algoritmo LT-GEE (B) e pelos dados da série temporal do MapBiomias (C).	74
Figura 4.9. Padrões temporais de NDVI para Amostra 20 na plataforma SATVeg (A) e os correspondentes resultados produzidos pelo algoritmo LT-GEE (B) e pelos dados da série temporal do MapBiomias (C).	75
Figura 4.10. Resultado da análise comparativa entre os dados do SATVeg e os dados do LT-GEE.	76
Figura 5.1. Localização das áreas embargadas pelo Ibama para amostra.	80
Figura 5.2. Distribuição das cinco classes fundiárias no município de Altamira, PA. O município não possui terras quilombolas, motivo pelo qual essa classe não será analisada na pesquisa.	81
Figura 5.3. Quantidade de amostras por tipo fundiário em Altamira, PA. O município não possui terras quilombolas, motivo pelo qual essa classe não será analisada na pesquisa.	82
Figura 5.4. Quantidade de amostras em propriedades rurais sobrepostas com outras categorias fundiárias.	82
Figura 5.5. Quantidade de amostras em Terras Indígenas que tiveram perda de vegetação ou regeneração, e respectivas porcentagens.	83
Figura 5.6. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 72 na plataforma do LT-GEE.	84
Figura 5.7. Quantidade de amostras em Unidades de Conservação que tiveram perda de vegetação ou regeneração, e respectivas porcentagens.	84
Figura 5.8. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 9 na plataforma do LT-GEE.	85

Figura 5.9. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 36 na plataforma do LT-GEE.	85
Figura 5.10. Quantidade de amostras em Assentamentos Rurais que tiveram perda de vegetação ou regeneração, e respectivas porcentagens.	86
Figura 5.11. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 49 na plataforma do LT-GEE.	86
Figura 5.12. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 57 na plataforma do LT-GEE.	87
Figura 5.13. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 54 na plataforma do LT-GEE.	87
Figura 5.14. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 9 na plataforma do LT-GEE.	88
Figura 5.15. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 36 na plataforma do LT-GEE.	88
Figura 5.16. Quantidade de amostras em Terras Públicas Não Destinadas que tiveram perda de vegetação ou regeneração, e respectivas porcentagens.....	89
Figura 5.17. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 50 na plataforma do LT-GEE.	90
Figura 5.18. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 50 na plataforma do LT-GEE.	90
Figura 5.19. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 69 na plataforma do LT-GEE.	91
Figura 5.20. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 85 na plataforma do LT-GEE.	92
Figura 5.21. Quantidade de amostras em Imóveis Rurais que tiveram perda de vegetação ou regeneração, e respectivas porcentagens.	92
Figura 5.22. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 35 na plataforma do LT-GEE.	93
Figura 5.23. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 49 na plataforma do LT-GEE.	93
Figura 5.24. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 54 na plataforma do LT-GEE.	94
Figura 5.25. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 57 na plataforma do LT-GEE.	94

Figura 5.26. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 60 na plataforma do LT-GEE.	94
Figura 5.27. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 62 na plataforma do LT-GEE.	95
Figura 5.28. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 72 na plataforma do LT-GEE.	95
Figura 5.29. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 77 na plataforma do LT-GEE.	95
Figura 5.30. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 84 na plataforma do LT-GEE.	96
Figura 5.31. Número e porcentagem de amostras com regeneração, com perda de vegetação e com trajetórias constantes nos cinco tipos fundiários.	96
Figura 5.32. Número de amostras em Imóveis Rurais contidas nas demais classes fundiárias.	97
Figura 5.33. Número de amostras em Imóveis Rurais localizadas nas demais classes fundiárias, divididas por amostras com regeneração, amostras com perda de vegetação e amostras com trajetória constante.	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. Distribuição do desmatamento ocorrido em cada estado da Amazônia Legal, dividido por categoria fundiária.	19
Tabela 3.1. Estatística descritiva sobre 2.060 áreas embargadas pelo Ibama no município de Altamira, Pará, no período 2003-2021.....	60
Tabela 3.2. Distribuição de embargos no município de Altamira, Pará, no período 2003-2021, segundo as cinco diferentes dominialidades territoriais encontradas nesse município.....	61
Tabela 3.3. Número da latitude e da longitude das 50 áreas embargadas pelo Ibama para amostra.....	62
Tabela 3.4. Número de amostras localizadas em propriedades rurais, as quais também encontram se inseridas em outros tipos.	64
Tabela 4.1. Número da latitude e da longitude das Amostras cujos dados e gráficos são demonstrados nesse capítulo.....	66
Tabela 5.1. Área total (em km ²) de classes fundiárias e propriedades privadas no município de Altamira, Pará.....	82
Tabela 5.2. Dados dos valores espectrais do NDVI (Original) e dados do melhor modelo de ajuste para os valores espectrais (Fitted) da amostra 50 (Max: 1,000.000. Min: -1,000.000).....	89
Tabela 5.3. Dados dos valores espectrais do NDVI (Original) e dados do melhor modelo de ajuste para os valores espectrais (Fitted) da amostra 69 (Max: 1,000.000. Min: -1,000.000).....	91
Tabela 5.4. Número de amostras em Imóveis Rurais localizadas nas demais classes fundiárias, divididas por amostras com regeneração, amostras com perda de vegetação e amostras com trajetória constante.....	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APP	Áreas de Proteção Permanente
ART	Anotação de Responsabilidade Técnica
CAR	Cadastro Ambiental Rural
CCIR	Certificado de Cadastro do Imóvel Rural
CNFP	Cadastro Nacional de Florestas Públicas
FAO	Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação
FNDP	Fundo Nacional de Desenvolvimento Florestal
FUNAI	Fundação Nacional dos Povos Indígenas
GEE	<i>Google Earth Engine</i>
GIS	<i>Geographic Information System</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EVI	Índice de Vegetação Realçado
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMBIO	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
IDHM	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
LandTrend	<i>Landsat-based detection of Trends in Disturbance and Recovery</i>
LT-GEE	LandTrendr no <i>Google Earth Engine</i>
MapBiomass	Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil
MMA	Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NBR	Índice de Queima por Razão Normalizada
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
NDMI	Índice de Umidade por Diferença Normalizada
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development
PIB	Produto Interno Bruto

PPCDAm	Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal
PRODES	Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite
RL	Reserva Legal
SATVeg	Sistema de Análise Temporal da Vegetação
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
SFB	Serviço Florestal Brasileiro
SIGEF	Sistema de Gestão Fundiária
SINIMA	Sistema Nacional de Informação sobre Meio Ambiente
SNCR	Sistema Nacional de Cadastro Rural
SNUC	Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza
UC	Unidades de Conservação
UI	<i>User Interface</i>
TCA	<i>Tasseled Cap Angle</i>
TC	<i>Tasseled Cap</i>
TCB	<i>Tasseled Cap coefficients for Brightness</i>
TCG	<i>Tasseled Cap Greenness</i>
TCW	<i>Tasseled Cap Wetness</i>
ZEE	Zoneamento Ecológico-Econômico
WMS	<i>Web Map Service</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	17
INTRODUÇÃO	17
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	17
1.2. PROBLEMA DE PESQUISA	21
1.3. OBJETIVOS DE PESQUISA	21
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	21
CAPÍTULO 2	23
REVISÃO DE LITERATURA	23
2.1. DEGRADAÇÃO, DESMATAMENTO E REGENERAÇÃO	23
2.1.1. <i>Degradação</i>	23
2.1.2. <i>Desmatamento</i>	25
2.1.3. <i>Regeneração</i>	28
2.2. COMANDO E CONTROLE	28
2.2.1. <i>Fiscalização e Monitoramento Ambiental</i>	29
2.2.2. <i>Poder de Polícia e Eficácia da Fiscalização Ambiental</i>	30
2.2.3. <i>Embargo Ambiental</i>	31
2.2.4. <i>Plano de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm)</i>	32
2.2.5. <i>Eficiência e Eficácia</i>	33
2.3. DOMINIALIDADE TERRITORIAL	35
2.3.1. <i>Área Quilombola</i>	35
2.3.2. <i>Terra Indígena</i>	35
2.3.3. <i>Unidades de Conservação</i>	36
2.3.4. <i>Assentamento Rural</i>	37
2.3.5. <i>Terras Públicas Não Destinadas</i>	38
2.3.6. <i>Propriedade Privada</i>	40
2.4. SISTEMA DE CADASTRO AMBIENTAL RURAL (CAR)	41
2.5. LANDSAT-BASED DETECTION OF TRENDS IN DISTURBANCE AND RECOVERY (LANDTRENDR)	42
2.5.1. <i>Algoritmo</i>	42
2.5.2. <i>Plataformas Online</i>	45
2.5.3. <i>Graphical User Interface</i>	48
2.5.4. <i>LandTrendr no Google Earth Engine (LG-GEE)</i>	49
2.5.5. <i>UI Application LandTrendr Pixel Time Series Plotter</i>	50
2.5.6. <i>Sistema de Análise Temporal da Vegetação (SATVeg)</i>	51
2.5.7. <i>Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil (MapBiomias)</i>	55
CAPÍTULO 3	57
MATERIAIS E MÉTODOS	57
3.1. ÁREA DE ESTUDO	57
3.2. MATERIAIS	59
3.3. PROPOSTA METODOLÓGICA	61
CAPÍTULO 4	66
RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
4.1. RESULTADOS	66
4.2. DISCUSSÃO	75
CAPÍTULO 5	77
UTILIZAÇÃO DO LT-GEE EM POLÍTICAS PÚBLICAS	77

CAPÍTULO 6	100
CONSIDERAÇÕES FINAIS	100
REFERÊNCIAS.....	102

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

A Amazônia Legal é composta pelos estados do Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Roraima, Rondônia e pelas regiões situadas ao norte do paralelo 13° S do estado de Tocantins, e a oeste do meridiano 44° W do estado do Maranhão, abrangendo um território de 5.114.798 km² (LEMOS; SILVA, 2011). A Amazônia Legal possui um território de dimensões continentais, dispõe de ampla diversidade de ecossistemas, compostos por distintas condições de vegetação, clima e solos (MARTHA JÚNIOR; CONTINI; NAVARRO, 2011).

A Amazônia não compreende apenas áreas de florestas tropicais. Parte da Amazônia é composta por vegetação típica do Cerrado e do Pantanal, embora haja predominância de florestas tropicais (CARVALHO; DOMINGUES, 2016). A Amazônia corresponde a 1/3 das reservas de florestas tropicais úmidas, possuindo ainda enormes reservas minerais (IBGE, 2023a). Ela abriga 20% dos recursos hídricos superficiais do mundo e cerca de 40 mil espécies de plantas, 300 de mamíferos e 1,3 mil espécies de aves (ICMBIO, 2023). Entretanto, o seu papel vai muito além de abrigar a biodiversidade. A floresta auxilia a conservar e regular o ciclo das chuvas, o clima no planeta e diversos sistemas ecológicos complexos.

No entanto, a floresta vem sofrendo degradação contínua a vários anos. Grande parte da degradação ocorrida nas últimas décadas tem como consequência o efeito de bordas e fragmentos florestais isolados. Uma vez instalada a fragmentação, por causa da degradação, ocorre o efeito de borda, o qual pode promover mais degradação da área, em um segundo momento, em sob determinadas condições.

A área total degradada somente pela extração de madeira e queimadas foi equivalente a aproximadamente metade da área desmatada, sendo a outra metade causada pela abertura do terreno para pasto, cultivo, estradas e outros. Dentre 1992 a 2014, aproximadamente 40% de toda a floresta degradada pode ser atribuída à extração intensiva de madeira e a queimadas, e aproximadamente 60% da área degradada possui efeitos de borda e fragmentos de floresta isolados (MATRICARDI et al., 2020).

Os fatores que causam a degradação são associados a uma série de fatores subjacentes que operam em escala regional ou local (como falta de governança, presença

de estradas ou demanda por alimentos locais) ou que resultam de influências nacionais ou globais (por exemplo, demanda do mercado por *commodities*, crédito e mudanças climáticas) que coexistem e interagem entre si. Muitos dos fatores de perturbação florestal são, em grande parte, independentes do processo de desmatamento da Amazônia. Parte da extração de madeira ocorre em regiões remotas, longe das fronteiras de desmatamento; os incêndios podem se estender profundamente em áreas florestais em anos de seca; e as secas são generalizadas em toda a bacia (LAPOLA et al., 2023).

O estado brasileiro tem criado diversos mecanismos para inibir o desmatamento ilegal. Dentre eles, o monitoramento e a fiscalização da floresta amazônica têm destaque nas políticas públicas. A fiscalização ambiental estatal é feita por diversos organismos governamentais municipais, estaduais e federais. Na esfera federal, a fiscalização, realizada pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama) na Amazônia Legal, é significativa, principalmente pelo grande número de missões de fiscalização para combater violações contra o meio ambiente. Os agentes de fiscalização ambiental aplicam sanções contra infratores, sejam eles pessoas físicas ou jurídicas (SCHMITT, 2015).

Dentre as sanções aplicadas pelo Ibama, destaca-se o embargo ambiental, que corresponde a um impedimento, em caráter temporário ou definitivo, de uma obra que careça de licenças ou autorizações legais necessárias, que exceda os limites dos atos administrativos, ou que configure potencial ou efetivo risco de danos à saúde ou ao meio ambiente (MILARÉ, 2015a). As ações de fiscalização do Ibama são utilizadas em políticas públicas como o Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm), implantado primeiramente no ano de 2004, e que está atualmente em sua quinta fase (FERREIRA; CORLETO, 2023).

Devido aos pós altos índices de desmatamento da floresta amazônica, o governo brasileiro desenvolveu um plano de trabalho para combater o desmatamento na região amazônica. A partir do Grupo Permanente de Trabalho Interministerial sobre o Desmatamento da Amazônia, como foi denominado, foi criado o Plano de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm). Sua meta é promover a redução das taxas de desmatamento na Amazônia brasileira, utilizando ações integradas de ordenamento territorial e fundiário, monitoramento e controle, fomento a atividades produtivas sustentáveis e infraestrutura, envolvendo parcerias entre órgãos federais, governos estaduais, prefeituras, entidades da sociedade civil e setor privado (BIZZO; DE FARIAS, 2017).

Em sua quinta fase, o Ministério do Meio Ambiente e Mudanças do Clima (MMA) analisou a distribuição do desmatamento ocorrido em cada estado da Amazônia Legal em áreas com e sem o Cadastro Ambiental Rural (CAR), sobrepondo-as com as seguintes categorias fundiárias: área quilombola; terra indígena; unidade de conservação; assentamento rural; terra pública não destinada; e áreas privadas ou sem informação (Tabela 1.1) (MMA, 2023a).

Tabela 1.1. Distribuição do desmatamento ocorrido em cada estado da Amazônia Legal, dividido por categoria fundiária. Fonte: MMA (2023a).

Estado	Área Quilombola (%)	Terra Indígena (%)	Unidade de Conservação*	Assentamento Rural (%)	Terra Pública Não Destinada** (%)	Áreas Privadas ou Sem Informação (%)
AC		0,30	18,64	33,29	7,58	40,19
AM	0,01	1,08	2,12	37,35	49,27	10,17
AP		10,24	31,61	18,35	30,85	8,94
MA	0,19	0,94	2,97	37,80	13,89	44,22
MT		1,09	0,80	9,44	2,59	86,15
PA	0,10	3,10	17,96	39,51	27,79	11,54
RO	0,01	1,95	29,08	20,78	32,78	15,40
RR		7,01	0,25	52,94	39,74	0,07
TO			5,47	28,63	21,63	44,26

*Inclui Área de Proteção Ambiental

**Glebas federais e estaduais

Com os avanços tecnológicos das últimas décadas, a utilização de geotecnologias para monitoramento ambiental se tornou uma ferramenta importante de gestão ambiental (AZEVEDO et al., 2021). Geotecnologias como o sensoriamento remoto configuram-se como uma ferramenta vital na obtenção e manipulação de dados temporais, permitindo integrar diferentes naturezas de dados (WECKMÜLLER; ZEBENDE; VICENS, 2018).

Devido a fatores como os avanços da aquisição repetitiva de dados, o melhoramento da qualidade das imagens, e o formato digital que possibilita o processamento dos dados por sistemas de informática, os dados de sensoriamento remoto têm se tornado uma importante fonte de dados para diferentes tipos de aplicação de detecção de mudanças na superfície da Terra (LU et al., 2004). Dentre as possibilidades de uso de dados do sensoriamento remoto, pode-se apontar o estudo das trajetórias evolutivas, as quais tornam possível o acompanhamento da dinâmica da cobertura da terra a partir de uma série histórica (SANT'ANNA; FERRAZ; ALMEIDA, 2023).

Na literatura especializada, há diversas técnicas para aplicação e estudo de detecção de mudanças e de trajetórias de séries temporais (LU et al., 2004). Nesse estudo, destacamos a utilização do *Landsat-based detection of Trends in Disturbance and Recovery* (LandTrendr) um algoritmo criado por Kennedy et al. (2010) para detecção de tendências de perturbação e recuperação florestal utilizando séries cronológicas anuais do satélite Landsat.

O LandTrendr é um conjunto de algoritmos de processamento e análise designado para detectar eventos e tendências dentro de uma série temporal (KENNEDY; YANG; COHEN, 2010). Esse algoritmo gera curvas espectro-temporais em escala de pixel por meio de três etapas principais: pré-processamento, segmentação temporal e classificação das trajetórias (WECKMÜLLER; ZEBENDE; VICENS, 2018). O LandTrendr utiliza uma estrutura baseada em pixels. Ele traça uma trajetória espectral desse pixel para análise de um período interanual (SANT'ANNA; FERRAZ; ALMEIDA, 2023). Dessa forma, o algoritmo faz um registro histórico desse pixel (UNIVERSIDADE DE OREGON, 2023).

Ademais, nos últimos anos, com a implementação de sistemas de informações geográficas (SIG) baseado na rede mundial de computadores, geoportais e plataformas *online* vêm sendo utilizados por pesquisadores para obter e analisar dados geoespaciais (GAO et al., 2024). Para facilitar a utilização desses geoportais e plataformas, empresas e pesquisadores de tecnologia da informação criaram mecanismos que facilitam a comunicação entre os geoportais e plataformas com os usuários finais sem que estes precisem se especializar no uso de sistemas informatizados. Desses mecanismos, destacam-se os aplicativos de interface gráfica do usuário (GUI, *Graphical User Interface*), considerado como elemento do sistema computacional com a qual o usuário realiza as ações desejadas do sistema para receber seus resultados, os quais são interpretados pelo usuário que então define suas próximas ações (PRATES; BARBOSA, 2007) e que utiliza elementos gráficos na interação homem-computador (BARRETO et al., 2018).

Com o intuito de auxiliar os interessados no uso do LandTrendr, Kennedy et al. (2018) implementaram o algoritmo na plataforma *Google Earth Engine* (LT-GEE) o qual é disponibilizado gratuitamente pela Universidade de Oregon dos Estados Unidos (<https://emapr.github.io/LT-GEE/index.html>) (UNIVERSIDADE DE OREGON, 2023). Para a utilização do LT-GEE, essa universidade desenvolveu os seguintes aplicativos de interface gráfica do usuário para explorar séries temporais: *UI LandTrendr Pixel Time*

Series Plotter; *UI LandTrendr Change Mapper*; *UI LandTrendr Fitted Index Delta RGB Mapper*; *UI LandTrendr Time Series Animator*; e *UI LandTrendr Visualilzation and Download Tool*

Este trabalho de pesquisa tratará apenas do aplicativo *UI LandTrendr Pixel Time Series Plotter* disponível do sítio eletrônico <https://emaprlab.users.earthengine.app/view/lt-gee-pixel-time-series>, o qual traça a fonte de reflectância de superfície do Landsat e o índice ajustado pelo LandTrendr para um local selecionado pelo usuário, cujos *scripts* foram concebidos para explorar e visualizar o espaço espectral-temporal de um pixel, comparar a eficácia de uma série de índices a fim de identificar mudanças no solo, e parametrizar o LandTrendr na região de estudo do usuário.

1.2. Problema de Pesquisa

Esta pesquisa aborda a seguinte questão científica: o aplicativo de GUI *LandTrendr Pixel Time Series Plotter* é adequado para verificar a restauração da vegetação nativa desmatada e degradada na Amazônia brasileira?

1.3. Objetivos de Pesquisa

O objetivo deste estudo é analisar a efetividade do aplicativo *LandTrendr Pixel Time Series Plotter* para verificar a regeneração da vegetação nativa em áreas embargadas pelo Ibama na Amazônia brasileira.

1.4. Estrutura da Dissertação

O trabalho é estruturado da seguinte forma: o Capítulo 1 inclui a contextualização, o problema de pesquisa e os objetivos da pesquisa; o Capítulo 2 abrange a revisão de literatura; o Capítulo 3 contém a comparação analítica dos dados produzidos pelas plataformas SATVeg e MapBiomas para a detecção de mudanças em trajetórias temporais em áreas degradadas na floresta amazônica; o Capítulo 4 abrange a aplicação da *GUI* em áreas embargadas pelo Ibama no município de Altamira, no estado do Pará, discriminadas em terras indígenas, terras quilombolas, unidades de conservação, assentamentos rurais, propriedades privadas e glebas públicas sem destinação; e o

Capítulo 5 apresenta as considerações finais, incluindo-se as oportunidades para estudos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Degradação, Desmatamento e Regeneração

2.1.1. Degradação

Degradação é o resultado de um progressivo declínio na estrutura, composição e funcionalidade da floresta. Uma floresta degradada é aquela na qual sua estrutura, função, composição das espécies ou produtividade tem sido severamente modificada ou permanentemente perdida por atividades antrópicas danosas (VÁSQUEZ-GRANDÓN; DONOSO; GERDING, 2018). A degradação florestal ocorre dentro da floresta e pode ser caracterizada por uma perda da biomassa no estrato superior da floresta intacta. É também um resultado secundário do desmatamento florestal. A degradação produz como consequência os efeitos de borda e trechos de florestas fragmentadas (MATRICARDI et al., 2020).

Uma floresta degradada caracteriza-se por ter a provisão de seus bens e de seus serviços ecossistêmicos reduzida e cuja cobertura vegetal nativa não apresenta conversão completa em outro uso de terra (TRAMONTINA; KUPLICH, 2023). Já a degradação antrópica inclui as ações humanas reconhecidas como causadoras de mudanças físicas em uma floresta que levam ao declínio das funções ecológicas, tais como danos causados pelo desmatamento, colheita excessiva de determinadas espécies e mudanças nos regimes de queimadas e inundações (WATSON et al., 2018).

Ainda que a presença humana na floresta amazônica date de muitos anos (PIPERNO; MCMICHAEL; BUSH, 2015), o desmatamento e a degradação da floresta começaram a ser intensificadas apenas a partir da época moderna (FEARNSIDE, 2022). Em geral, a degradação é mais espacialmente dispersa na paisagem do que o desmatamento. Este último é bastante concentrado no “arco do desmatamento” que faz fronteira com o bioma Cerrado. Existem zonas com grande concentração de degradação perto de áreas antigas de desmatamento. Contudo, a degradação vem crescendo também no oeste da Amazônia brasileira, particularmente em decorrência de novas áreas desmatadas. A organização espacial da exploração madeireira sugere que a degradação está cada vez mais dissociada da queimada da vegetação rasteira localizada abaixo das maiores árvores. O desmatamento está se deslocando cada vez mais distante do “arco do

desmatamento”, enquanto as áreas queimadas permanecem mais restritas às áreas mais antigas de desmatamento (MATRICARDI et al., 2020).

Os efeitos de borda e os fragmentos florestais isolados têm contribuído substancialmente para o aumento da degradação florestal, mas a contribuição da fragmentação está diminuindo, enquanto a degradação, decorrente da exploração madeireira e, em menor grau, do fogo, está se tornando mais proeminente. Wang et al. (2024) concluíram que ocorreu um declínio temporal da resiliência na floresta amazônica brasileira no período de 1992 a 2014. Essa pesquisa indicou que o nível médio da resiliência da floresta, definida como a capacidade de recuperação de perturbações, sofreu declínio por causa da degradação decorrente de perturbação antrópica, o número de áreas degradadas é maior que o de áreas desmatadas na Amazônia brasileira, mas também a perda de carbono decorrente de áreas florestais degradadas ultrapassa a perda resultante de áreas desmatadas na floresta amazônica (QIN et al., 2021).

Os elementos que causam a degradação compartilham uma série de fatores subjacentes que operam em escala regional ou local, como a falta de governança, presença de estradas ou demanda por alimentos locais, ou que resultam de influências nacionais ou globais, por exemplo, demanda do mercado por *commodities*, crédito e mudanças climáticas. Muitos desses fatores estão ligados ao desmatamento, como, por exemplo, a expansão agrícola em terras florestais, a qual aumenta a exposição das florestas remanescentes aos efeitos de borda, à extração de madeira e às fontes de ignição agrícola que iniciam muitos dos incêndios florestais. No entanto, outros fatores importantes de perturbação florestal são, em grande parte, independentes do processo de desmatamento da Amazônia. Parte da extração de madeira ocorre em regiões remotas, longe da fronteira do desmatamento; os incêndios podem se estender profundamente em áreas florestais em anos de seca; e as secas são generalizadas em toda a bacia (LAPOLA et al., 2023).

Matricardi et al. (2020) identificaram duas categorias amplas de tipos de degradação florestal: aqueles que dependem do desmatamento ou estão associados a ele, e aqueles que são mais independentes do desmatamento ou estão dissociados dele, como a exploração madeireira e, em menor grau, as queimadas abaixo das copas das grandes árvores.

Os fatores relacionados à degradação florestal frequentemente coexistem e interagem entre si. Além disso, há relações importantes e em várias escalas entre os fatores que causam os distúrbios e seus impactos. Em escala regional, o desmatamento ou os distúrbios relacionados à degradação são associados ao aquecimento do clima

daquela região e alteram a precipitação, podendo aumentar a seca. Em escala global, as emissões de dióxido de carbono provenientes de distúrbios florestais são os principais contribuintes para a mudança climática, a qual pode causar secas extremas que promovem ou amplificam a degradação. Os distúrbios antropogênicos nas florestas amazônicas são, portanto, o resultado da interação entre um amplo conjunto de fatores que se expressam e interagem em várias escalas espaciais (LAPOLA et al., 2023).

A degradação ambiental na floresta amazônica gera diversos efeitos negativos, tais como: aumento da emissão de CO₂ na atmosfera (ALBERT et al., 2023); perda da biodiversidade (OLIVEIRA et al., 2023); alterações profundas nos ecossistemas (DAVIDSON et al., 2012); estações secas mais longas do que as estações chuvosas (DEBORTOLI et al., 2015); aumento de secas severas na região (DAVIDSON et al., 2012); alteração da função dos lençóis freáticos, modificando o ciclo de vida da floresta e da vegetação (COSTA et al., 2023); diferenciação do regime hidrológico de áreas degradadas e fragmentadas da floresta intacta (LAURANCE et al., 2011); decréscimo da precipitação e da evapotranspiração (RIQUETTI et al., 2023); diminuição da conectividade entre os rios, alterando o curso desses, mudando o regime de sedimentação e impactando espécies que dependem dos rios (CALDAS et al., 2023); decréscimo da produção de energia hidroelétrica, bastante utilizadas na base energética do Brasil (SERRÃO et al., 2023); alteração do modo de vida das populações tradicionais que historicamente dependem dos recursos hídricos, principalmente dos rios (SANTOS et al., 2023); piora da saúde pública e aumento de doenças infecciosas (ELLWANGER et al., 2020); e outros (IPCC, 2023).

2.1.2. Desmatamento

Oca et al. (2021) elaboraram um quadro de referência conceitual para a definição de desmatamento. A definição a ser utilizada deve contemplar os seguintes parâmetros: termos usados para descrever o desmatamento; base para a definição de floresta; formas de vegetação consideradas como floresta; origem da vegetação considerada como floresta; estado da floresta; trajetória do desmatamento na floresta; causas do desmatamento; limite da floresta e do desmatamento; e a escala metodológica.

Vários estudos enfatizam a necessidade de harmonizar as definições e os métodos para estimar o desmatamento, permitindo comparações diretas entre conjuntos de dados (OCA et al., 2022). A metodologia para mensurar o desmatamento é importante na

medida em que sua caracterização pode levar à incerteza relacionada à falta de conhecimento e a informações inadequadas sobre a região em estudo.

O conceito de desmatamento utilizado nesta pesquisa decorre de outros trabalhos sobre desmatamento na Amazônia Legal. Nesse sentido, considera-se desmatamento a completa conversão da floresta em outro tipo de uso do solo, sendo que, na floresta amazônica brasileira, geralmente a área desmatada é convertida para pastagem (MATRICARDI et al., 2020).

Em 2023, o Brasil alcançou avanços ambientais positivos na floresta amazônica. As taxas oficiais de desmatamento caíram em relação ao ano anterior, o número total de queimadas diminuiu entre 2023 e 2022, em especial, as queimadas procedentes de desmatamento. Entretanto, embora frequentemente seja dada ênfase às taxas de desmatamento, o desmatamento não é a única ameaça às florestas em pé da Amazônia.

Degradação e desmatamento estão intimamente relacionados. A degradação é uma ameaça ambiental menos visível, mas também generalizada. Os incêndios contribuem para as crescentes extensões de florestas degradadas, sendo que o fogo é frequentemente associado ao desmatamento quando é usado para limpar os detritos caídos. No entanto, há vários tipos de incêndios na região não diretamente relacionados ao desmatamento. Os incêndios florestais conduzem à degradação, especialmente durante os anos de seca, incluindo o período 2023–2024 (MATAVELI et al., 2024).

De forma análoga à degradação florestal, o desmatamento passou a se intensificar a partir da época de 1970 (FEARNSIDE, 2022). Em 1975, quando os grandes projetos de desenvolvimento foram criados ou iniciados, foram identificadas aproximadamente 27.000 km² de área desmatada. Dez anos depois, o desmatamento atingiu cerca de 352.000 km², um aumento de 1.171% desde 1975. Depois de 1985, o desmatamento continuou a avançar, mas a taxas mais baixas. Assim, as perdas florestais em 2015 e em 2018 foram similares: 765.977 km² ou 19% e 788.353 km² ou 20%, respectivamente (CRUZ et al., 2021).

Em 2007, 45% de todas as terras desmatadas na Amazônia brasileira ocorreram nos 36 municípios até então prioritários para combater e controlar o desmatamento. Em 2018, 41 municípios amazônicos foram classificados como prioritários e 21 municípios adicionais foram considerados como de desmatamento controlado. O desmatamento acumulado nesses 41 municípios representou 23% da área desmatada na região. Por outro lado, os 21 municípios com desmatamento controlado compreendiam 11% da área desmatada até 2018. Além disso, entre 2007 e 2018, os referidos 41 e 21 municípios

sofreram um desmatamento total de 4,4% e 3,9%, respectivamente. Os 713 (66%, aproximadamente 520.000 km²) municípios restantes não estavam na lista de prioridades para combater e controlar o desmatamento (CRUZ et al., 2021).

Em 2019, a Amazônia Legal teve 10.895 km² de áreas desmatadas. Em 2020, 2021 e 2022, esses números foram de 10.499 km², 12.416 km² e 12.695 km², respectivamente (INPE, 2023). De 2021 a 2022, houve um incremento de 190.433 ha de área desmatada na Amazonia. Em 2022, os estados da Amazônia Legal apresentaram 1.477.787 ha de área desmatada (AZEVEDO et al., 2023).

O desmatamento é impulsionado principalmente pela expansão agrícola e pelo desenvolvimento da infraestrutura. As atividades humanas são os principais fatores, especialmente aquelas relacionadas com agricultura, pecuária, extração de madeira e mineração. Essas atividades são impulsionadas por fatores internos e externos, como o crescimento econômico, a demanda por produtos agrícolas e o desenvolvimento da infraestrutura (MOREIRA, 2024). Na floresta amazônica brasileira, a área desmatada majoritariamente é convertida para pastagem (MATRICARDI et al., 2020).

De 2004 a 2018, os municípios alvos da lista de municípios prioritários para o plano de ações de prevenção, monitoramento, controle e redução de desmatamentos e degradação florestal (BRASIL, 2023) se tornaram relativamente mais sustentáveis, apesar do crescimento da produção de soja. Esses municípios reduziram o desmatamento e a expansão das pastagens em 70% e 85%, respectivamente. Ao mesmo tempo, a expansão da área de soja aumentou em 103%. Ambos os efeitos foram possíveis porque os municípios expandiram a produção de soja quase que exclusivamente em pastagens existentes e outras áreas de cultivo (61% e 50% a mais, respectivamente, do que nos municípios não pertencentes à lista).

Houve um aumento significativo nas exportações de soja para a China (83%) e outros países fora da União Europeia (EU) (71%), enquanto as exportações para a UE estagnaram. Apesar de a produção agrícola ser economicamente mais favorável em relação aos produtos florestais, os exportadores permanecem relutantes em obter mais soja para a UE de regiões com um histórico de altas taxas de desmatamento ilegal e correspondentes emissões de gases de efeito estufa, bem como perda de biodiversidade. Os comerciantes internacionais da UE são bastante sensíveis à pressão pública negativa, e suas participações comerciais podem ser reduzidas caso os produtos estejam associadas com desmatamento (DAMM; CISNEROS; BÖRNER, 2024).

As taxas de desmatamento na Amazônia brasileira são afetadas também pela aplicação da legislação ambiental, embora essa aplicação ocorra sob uma combinação complexa de interesses políticos que interagem com a dinâmica do mercado. As políticas de comando e controle podem fomentar investimentos em sistemas de produção ambientalmente sustentáveis. Compromissos de sustentabilidade privados e voluntários podem complementar a regulamentação estatal, mas dificilmente podem substituí-la. No entanto, a aplicação da legislação ambiental continua sendo a espinha dorsal de qualquer combinação eficaz de políticas voltadas para a conservação florestal (NUNES et al., 2024).

2.1.3. Regeneração

Ao longo da floresta amazônica, florestas tropicais secundárias estão crescendo nas áreas degradadas, sendo que o seu papel na conservação da biodiversidade ainda não se encontra totalmente estudado (CHAZDON et al., 2009). Vegetação secundária consiste nas áreas originalmente florestais que foram desmatadas, utilizadas para outros fins, e depois deixadas para regenerar, assumindo novamente um aspecto florestal (ALMEIDA et al., 2016). A restauração se relaciona com a remoção de fatores de perturbação e isolamento da área para que a regeneração aconteça. A regeneração pode ser passiva, isto é, ocorre de forma natural, ou ativa, com interferência humana para acelerar o processo de regeneração, facilitando o reestabelecimento da estrutura vegetal, a ecologia das comunidades e a recuperação dos ecossistemas (TRENTIN et al., 2018).

A regeneração florestal traz diversos potenciais para a recuperação da área degradada, embora varie bastante, dependendo de variáveis como solo, grau de degradação, volume de precipitação, microclima e técnicas de regeneração (CROUZEILLES et al., 2017). Algumas das vantagens da regeneração florestal são: mitigação dos efeitos das mudanças climáticas (GRISCOM et al., 2017); aumento no sequestro e estoque de CO₂ (BASTIN et al., 2019); melhoria das condições ambientais dos *habitats* adequados a várias espécies florestais (CHAZDON, 2012); aumento da riqueza de espécies vegetais (CHAZDON et al., 2023); auxílio na conservação da fauna (DENT; JOSEPH WRIGHT, 2009); e aumento nos benefícios socioeconômicos (CHAZDON; BRANCALION, 2019).

2.2. Comando e Controle

2.2.1. Fiscalização e Monitoramento Ambiental

O governo brasileiro tem criado diversos mecanismos para inibir a degradação florestal e o desmatamento ilegal, destacando-se o monitoramento e a fiscalização da floresta amazônica. A fiscalização ambiental estatal é feita por diversos organismos governamentais a nível municipal, estadual e federal. Na esfera federal, a fiscalização, realizada pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama) na Amazônia Legal, é significativa, principalmente pelo grande número de missões de fiscalização. O Ibama é uma autarquia federal dotada de personalidade jurídica de direito público, autonomia administrativa e financeira, vinculado ao Ministério do Meio Ambiente e Mudança Climática (IBAMA, 2023a). Suas ações de fiscalização são realizadas por meio de medidas preventivas, monitoramento, inspeção, advertência e punição, dentre outras. A fim de combater a violação contra o meio ambiente, os agentes de fiscalização ambiental estatal aplicam sanções contra infratores, sejam eles pessoas físicas ou jurídicas (SCHMITT, 2015).

O governo brasileiro também se dedica a criar instrumentos legais para a proteção do meio ambiente e dos recursos naturais. A seguir, são apresentadas algumas normas legais que marcaram a legislação ambiental brasileira. A Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, que tem, por objetivo, a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental propícia à vida, visando assegurar condições ao desenvolvimento socioeconômico, aos interesses da segurança nacional e à proteção da dignidade da vida humana (BRASIL, 1981).

A Constituição da República Federativa do Brasil de 1988, especificamente em seu artigo 225, assegura que todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se, ao Poder Público e à coletividade, o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações (BRASIL, 1988). A Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente (BRASIL, 1998). A Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, chamado popularmente de Novo Código Florestal, dispõe sobre a proteção da vegetação nativa (BRASIL, 2012).

Para fazer cumprir a legislação ambiental, o estado brasileiro criou vários mecanismos, dentre eles, o Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento

na Amazônia Legal (PPCDAm), implantado primeiramente no ano de 2004, e que está atualmente em sua quinta fase (FERREIRA; CORLETO, 2023). Em sua quinta fase, o MMA analisou a distribuição do desmatamento ocorrido em cada estado da Amazônia Legal em áreas com e sem o Cadastro Ambiental Rural (CAR), sobrepondo-as com as seguintes categorias fundiárias: área quilombola; terra indígena; unidade de conservação; assentamento rural; terra pública não destinada; e áreas privadas ou sem informação (MMA, 2023b).

2.2.2. Poder de Polícia e Eficácia da Fiscalização Ambiental

O poder de polícia na administração pública é disposto pelo Código Tributário Nacional, de 1966, alterado posteriormente, em seu artigo 78, como atividade da administração pública que, limitando ou disciplinando direito, interesse ou liberdade, regula a prática de ato ou abstenção de fato, em razão de interesse público concernente à segurança, à higiene, à ordem, aos costumes, à disciplina da produção e do mercado, ao exercício de atividades econômicas dependentes de concessão ou autorização do Poder Público, à tranquilidade pública ou ao respeito à propriedade e aos direitos individuais ou coletivos (BRASIL, 1966).

O poder de polícia ambiental é um instrumento que busca dar maior efetividade ao regramento ambiental, ao apresentar uma nova conduta de ação do Poder Público, visando o agir preventivo e responsivo pelos agentes públicos (SCHMIDT, 2017). O poder de polícia empregado à esfera ambiental procede da polícia administrativa, a qual se estende a bens, direitos e atividades, inerente à administração pública. Por meio do poder de polícia ambiental, o poder público exerce a disposição constitucional de proteger o meio ambiente, edificado como condição jurídico de bem de uso comum da população (FERNANDES; OLIVEIRA, 2018).

A fiscalização ambiental é um instrumento de gestão ambiental exercida pelo poder público, o qual consiste em verificar o cumprimento das normas ambientais e em aplicar as sanções administrativas quando não houver conformidade, atuando de maneira preventiva e repressiva às transgressões ambientais (SCHMITT, 2015). O Decreto nº 6.514, de 22 de julho de 2008, que dispõe sobre as infrações e sanções administrativas ao meio ambiente, estabelece que as infrações administrativas ambientais serão punidas, entre outras, com multa simples, multa diária, embargo de obra ou atividade e suas respectivas áreas e suspensão parcial ou total das atividades (BRASIL, 2008).

Uma das formas de examinar a eficácia da fiscalização ambiental é por meio da mensuração da dissuasão promovida pela coerção administrativa, sendo que, para os fins deste trabalho, será considerada a dissuasão, entendida como o poder coercitivo administrativo do Estado, exercido por meio da atividade de fiscalização ambiental federal, gerada pela aplicação das multas ambientais e das áreas embargadas (SCHMITT, 2015). Vários estudos se dedicaram a analisar a eficiência da fiscalização ambiental, os quais demonstraram resultados desalentadores (BRITO; BARRETO, 2006). Apesar dos esforços do poder público, a impunidade é apontada como predominante na fiscalização do meio ambiente, em grande medida porque os infratores, mesmo sendo detidos pelo poder de polícia ambiental, acabam por não pagarem por seus crimes (BARRETO; ARAÚJO; BRITO, 2009).

Dentro de um conceito amplo, pode se definir a impunidade ambiental como a impossibilidade de investigar, perseguir, judicializar, sancionar e reparar os delitos e danos contra o meio ambiente; o não cumprimento de objetivos de política ambiental e climática; e a inexistência de estratégias e programas de políticas públicas de longo prazo ou intergeracionais (LE CLERCQ; CEDILLO, 2022). A impunidade ambiental brasileira, especificamente no caso do Ibama, no combate aos crimes ambientais, decorre fundamentalmente da ineficiência da administração pública em matéria processual, mais do que em campo (LOPES; CHIAVARI, 2021). Schmitt (2015), ao analisar a teoria econômica do crime de Becker (BECKER, 1974) e propor um modelo de mensuração da efetividade da fiscalização ambiental baseado na dissuasão gerada pelas sanções administrativas frente às vantagens econômicas obtidas com o modo de produção motivador do desmatamento, chegou à conclusão de que o desmatamento ilegal compensa, pois os rendimentos econômicos são maiores que os riscos de ser punido.

2.2.3. Embargo Ambiental

Entre os mecanismos utilizados pelo PPCDAm e pela fiscalização ambiental, está o embargo ambiental, caracterizado como a impedição, em caráter temporário ou definitivo, de uma obra que careça de licenças ou autorizações legais necessárias, ou que exceda os limites dos atos administrativos, ou que configure potencial ou efetivo risco de dano à saúde ou ao meio ambiente (MILARÉ, 2015a).

O embargo de obra ou atividade está previsto como sanção administrativa contra infrações no artigo 72 da Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, e no artigo 3º do

Decreto nº 6.514, de 22 de julho de 2008 (BRASIL, 2008). Seu objetivo é a promoção do reflorestamento e a recuperação de áreas desmatadas ou degradadas, sendo que se o embargo for desrespeitado, o infrator pode ser sancionado novamente (SILVA et al., 2022).

2.2.4. Plano de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm)

Em 2004, foi criado um grupo permanente de trabalho interministerial sobre o desmatamento da Amazônia. A partir desse grupo, foi lançado o Plano de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm), cujo objetivo é promover a redução das taxas de desmatamento na Amazônia brasileira por meio de um conjunto de ações integradas de ordenamento territorial e fundiário, monitoramento e controle, fomento a atividades produtivas sustentáveis e infraestrutura, envolvendo parcerias entre órgãos federais, governos estaduais, prefeituras, entidades da sociedade civil e setor privado (BIZZO; FARIAS, 2017).

A primeira fase do PPCDAm (2004–2008) priorizou quatro eixos temáticos: planejamento da política de utilização de terras, expansão de áreas protegidas e homologação de terras indígenas; controle e monitoramento, com auxílio de satélites para detecção de desmatamento, licenciamento ambiental e fortalecimento da aplicação das leis ambientais; promoção de atividades sustentáveis no uso da terra, fazendo uso de crédito financeiro para produtores rurais, pesquisa científicas; e desenvolvimento de infraestrutura sustentável, com foco nos setores de energia e transporte (WEST; FEARNSSIDE, 2021).

A segunda fase (2009–2011) incorporou as seguintes diretrizes: valorização da floresta para conservação da biodiversidade, manejo florestal e prestação de serviços ambientais; incentivos para melhor uso de áreas já desmatadas com inovação tecnológica e sistemas sustentáveis de produção; apoio a certificações e valorização de produtos da biodiversidade e oriundos de atividades locais; modelos alternativos de reforma agrária e consolidação de mais unidades de conservação e terras indígenas; gestão descentralizada e compartilhada de políticas públicas; estímulo à participação de diversos setores da sociedade amazônica; incentivo à implementação do CAR e regularização ambiental do imóvel rural; e dar publicidade às ações realizadas pelo PPCDAm (MELLO; ARTAXO, 2017).

Na terceira fase (2012–2015), o Plano concentrou-se em três principais eixos temáticos: ordenamento fundiário e territorial, com promoção do ordenamento fundiário de terras públicas, visando a conservação da floresta; monitoramento e controle, visando tornar mais célere o licenciamento dos planos de manejo florestal e concessões florestais, aumentar eficiência da fiscalização e controle do desmatamento, aumentar a presença do Estado na Amazônia Legal, reduzir a impunidade administrativa e criminal relacionada ao desmatamento ilegal e promover a responsabilização ambiental das cadeias produtivas relacionadas ao desmatamento ilegal; fomento às atividades produtivas sustentáveis, com a finalidade de promover a viabilidade das cadeias produtivas alternativas ao desmatamento, fomentar boas práticas agropecuárias, incentivar o manejo florestal sustentável e promover adequação ambiental e fomentar atividades produtivas sustentáveis nos assentamentos da reforma agrária e na agricultura familiar (MMA, 2013).

Na quarta fase (2016–2020), foi adicionado um novo eixo temático. Além dos antigos eixos, o Plano desenvolveu o eixo relacionado com instrumentos normativos e econômicos, o qual visava a elaboração de normas e de instrumentos econômicos, fiscais e tributários que contribuiriam para o combate ao desmatamento e agregação de iniciativas relacionadas aos demais eixos (MMA, 2018).

Em 2019, a política ambiental tomou novos rumos com a eleição do governo do presidente Jair Bolsonaro, ocorrendo a substituição do PPCDAm (FONSECA; LINDOSO; BURSZTYN, 2022). Em seu lugar, o governo federal implantou o Plano Nacional para Controle do Desmatamento Ilegal e Recuperação da Vegetação Nativa (2020–2023), que estabelecia cinco eixos temáticos: tolerância zero ao desmatamento ilegal; regularização fundiária; ordenamento territorial; pagamento por serviços ambientais; e bioeconomia (MMA, 2020).

O PPCDAm está em processo de reativação pelo atual presidente Luiz Inácio Lula da Silva (MMA, 2023b), sendo que nessa quinta fase do Plano, o grupo realizou a diferenciação de porcentagem do desmatamento na Amazônia Legal em áreas com e sem o CAR, sobrepostas com outras seis categorias fundiárias: área quilombola; terra indígena; unidade de conservação; assentamento rural; terra pública não destinada; e áreas privadas ou sem informação (MMA, 2023b).

2.2.5. Eficiência e Eficácia

Os conceitos de eficiência e eficácia são comumente usados, mas raramente definidos. Na literatura especializada, os pesquisadores não os usam como sinônimos, associando-os com aspectos organizacionais como liderança, comunicação, equipes de projeto, organização, custo, tempo, qualidade, ferramentas e outros. Muitos autores fazem uso da expressão utilizada pelo escritor e professor de administração Peter Drucker (2000), que discorre que eficiência é fazer as coisas de maneira certa, e eficácia é fazer as coisas certas (ZIDANE; OLSSON, 2017).

No contexto da administração de organizações, eficiência significa fazer certo o trabalho, ou seja, atingir a meta certa e obter bons resultados para a organização (ABDUL; AL-SAYED OMAR, 2023), ou seja, refere-se a realizar bem e corretamente as coisas com mínimo de custo ou desperdício, associando-se com os meios e métodos. Trata-se de uma medida da proporção dos recursos ou tempo utilizados para obter um resultado, ou seja, uma medida de metas comparadas com os recursos consumidos (CHIAVENATO, 2021). No campo da gestão da qualidade, a eficiência se refere a fazer as coisas corretamente, ou seja, o que quer que seja feito, é feito da maneira mais adequada, considerando os recursos disponíveis (alta eficiência) (SUNDQVIST; BACKLUND; CHRONÉER, 2014).

Já a eficácia consiste em concluir e complementar o trabalho de forma eficaz, ou seja, atingir as metas, os resultados, usando os recursos ou insumos disponíveis. Ser eficaz é obter grandes retornos por meio do uso dos recursos disponíveis ou da redução dos recursos usados no processo de produção (ABDUL; AL-SAYED OMAR, 2023). Significa atingir os objetivos e resultados planejados, vinculando-se com fins e propósitos. É uma medida do resultado da atividade ou do alcance da meta estabelecida (CHIAVENATO, 2021). Em gestão da qualidade, eficácia refere-se a fazer as coisas certas, ou seja, selecionar e concentrar-se na produção de um resultado para o qual há uma demanda (SUNDQVIST; BACKLUND; CHRONÉER, 2014).

Na gestão ambiental, a avaliação da eficiência envolve a avaliação do equilíbrio entre os benefícios e os custos da política ambiental, e a avaliação da eficácia envolve a avaliação do grau em que os objetivos predefinidos da política ambiental são alcançados (ZHOU et al., 2024).

Na mensuração da usabilidade de um *software*, entendida como uma medida na qual um produto pode ser usado por determinados usuários para alcançar objetivos específicos com eficácia, eficiência e satisfação em um determinado contexto de uso,

eficiência é relacionado com os recursos gastos em relação à acurácia e abrangência com as quais usuários atingem objetivos e eficácia por ser estabelecida como a acurácia e completude com as quais os usuários alcançam objetivos específicos (ABNT, 2021).

2.3. Dominialidade Territorial

2.3.1. Área Quilombola

A Constituição Federal de 1988, no artigo 68 dos Atos das Disposições Constitucionais Transitórias, afirma que, aos remanescentes das comunidades dos quilombos que estejam ocupando suas terras, são reconhecidas as propriedades definitivas, devendo o Estado emitir lhes os títulos respectivos (BRASIL, 1988). O procedimento para delimitação e demarcação das terras ocupadas por remanescentes das comunidades dos quilombos é regulamentada pelo Decreto nº 4.887, de 20 de novembro de 2003 (BRASIL, 2003). Esse decreto trata sobre o processo de identificação, reconhecimento, delimitação, demarcação e titulação dos territórios tradicionalmente ocupados por remanescentes das comunidades quilombolas e remete aos aspectos culturais de tais povos (SOARES; SILVA; OLIVEIRA, 2021).

Para a medição e demarcação das terras quilombolas, são considerados critérios de territorialidade indicados pela própria comunidade, sendo facultada a apresentação de peças técnicas para a instrução procedimental, tendo o Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA), a competência para a demarcação dessas terras, sem prejuízo da competência concorrente dos estados, do Distrito Federal e dos municípios (BRASIL, 2003).

2.3.2. Terra Indígena

A Constituição Federal de 1988, em seu artigo 231, reconhece aos povos indígenas a sua organização social, costumes, língua, crenças e tradições, e os direitos originários sobre as terras que tradicionalmente ocupam, competindo à União demarcá-las, proteger e fazer respeitar todos os seus bens (BRASIL, 1988). Os direitos e interesses dos indígenas estão relacionados à comunidade indígena como um todo e a cada indígena em particular como membro do grupo genético (FERRAZ JÚNIOR, 2004). A Carta Magna define que são terras tradicionalmente ocupadas pelos índios, as por eles habitadas em

caráter permanente, as utilizadas para suas atividades produtivas, as imprescindíveis à preservação dos recursos ambientais necessários a seu bem-estar e as necessárias à sua reprodução física e cultural, segundo seus usos, costumes e tradições (BRASIL, 1988).

A demarcação de território indígena é de competência do Poder Executivo, e passa pelos seguintes procedimentos administrativos: estudos de identificação e delimitação; contraditório administrativo; declaração dos limites; demarcação física; levantamento fundiário de avaliação de benfeitorias implementadas pelos ocupantes não-indígenas em conjunto com seus cadastros; homologação da demarcação; retirada de ocupantes não-indígenas e reassentamento dos mesmos; registro dos territórios indígenas na Secretaria de Patrimônio da União; e interdição de áreas para a proteção de povos isolados (SILVA; PUREZA, 2019).

2.3.3. Unidades de Conservação

A conservação ambiental no Brasil data da época colonial, embora a preocupação da coroa portuguesa fosse o aspecto econômico dos recursos naturais de sua colônia ultramarina (LOPES, 2014). A trajetória histórica da criação de áreas de conservação e proteção do meio ambiente no Brasil foi lenta e se confunde com a proteção dos recursos naturais como produtos econômicos (BORGES; REZENDE; PEREIRA, 2009). O estabelecimento da primeira área protegida em território brasileiro foi o Real Horto Botânico do Rio de Janeiro e que, com a chegada da família real portuguesa na colônia brasileira em 1808, passou a denominar Jardim Botânico do Rio de Janeiro, (HUGUENIN; MEIRELLES, 2022).

A primeira grande realização devido à preocupação com os aspectos florestais brasileiros ocorreu durante o Brasil Império com a iniciativa do imperador D. Pedro II em reflorestar e proteger a Floresta da Tijuca (CÂMARA, 2013). No entanto, o marco legal inicial para a criação de áreas protegidas no Brasil foi a publicação do primeiro Código Florestal Brasileiro em 1934 (THOMAS; FOLETO, 2013). Em 1981, a Política Nacional do Meio Ambiente orientou a criação de espaços territoriais protegidos como um instrumento dessa mesma política (BRASIL, 1981). Junta-se a isso, a publicação da Constituição de 1988 que deu relevância à proteção e preservação ambiental (BRASIL, 1988).

Embora houvesse variadas leis que permitiam a criação de áreas protegidas, foi a publicação da Lei Federal no 9.985, de 18 de julho de 2000, que criou o Sistema Nacional

de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC), o marco político na criação e manejo de unidades de conservação (UCs) (THOMAS; FOLETO, 2013). Essa lei define UC como espaço territorial e seus recursos ambientais, incluindo as águas jurisdicionais, com características naturais relevantes, legalmente instituído pelo Poder Público, com objetivo de conservação e limites definidos, sob regime especial de administração, ao qual se aplicam garantias adequadas de proteção (BRASIL, 2000; RYLANDS; BRANDON, 2005).

O SNUC possui os seguintes objetivos: contribuir para a manutenção da diversidade biológica e dos recursos genéticos no território nacional e nas águas jurisdicionais; proteger as espécies ameaçadas de extinção no âmbito regional e nacional; contribuir para a preservação e a restauração da diversidade de ecossistemas naturais; promover o desenvolvimento sustentável a partir dos recursos naturais; promover a utilização dos princípios e práticas de conservação da natureza no processo de desenvolvimento; proteger paisagens naturais e pouco alteradas de notável beleza cênica; proteger as características relevantes de natureza geológica, geomorfológica, espeleológica, arqueológica, paleontológica e cultural; proteger e recuperar recursos hídricos e edáficos; recuperar ou restaurar ecossistemas degradados; proporcionar meios e incentivos para atividades de pesquisa científica, estudos e monitoramento ambiental; valorizar econômica e socialmente a diversidade biológica; favorecer condições e promover a educação e interpretação ambiental, a recreação em contato com a natureza e o turismo ecológico; e proteger os recursos naturais necessários à subsistência de populações tradicionais, respeitando e valorizando seu conhecimento e sua cultura e promovendo-as social e economicamente (BRASIL, 2000).

As UCs podem ser classificadas em dois grupos. Unidades de Proteção Integral, que objetivam a preservação da natureza, com uso indireto de recursos naturais; e Unidades de Uso Sustentável, cujo objetivo é a compatibilização da conservação do meio ambiente com o uso sustentável de parcela de seus recursos naturais (LOPES, 2014). A criação de UCs auxiliam a manutenção do meio natural, conservação da biodiversidade, gestão do patrimônio genético e proteção de ecossistemas naturais (HASSLER, 2005).

2.3.4. Assentamento Rural

A Constituição Federal do Brasil de 1988 estabeleceu, em seu artigo 5, inciso XXIII, que a propriedade rural atenderá a sua função social. Em seu artigo 184,

estabeleceu ainda que a competência é da União em desapropriar, por interesse social e para fins de reforma agrária, o imóvel rural que não esteja cumprindo sua função social, e cuja utilização será definida em lei (BRASIL, 1988).

A Lei nº 8.629, de 25 de fevereiro de 1993, dispõe sobre a regulamentação dos dispositivos constitucionais relativos à reforma agrária, previstos na Carta Magna (BRASIL, 1993). O assentamento é um conjunto de unidades agrícolas instaladas pelo INCRA em um imóvel rural, sendo que cada unidade, ou parcelas ou lotes, é destinada a uma família de agricultor ou trabalhador rural que não possui condições econômicas de adquirir um imóvel rural próprio (INCRA, 2023). A expressão *assentamento* relaciona-se com o ato de ordenar ou reordenar recursos fundiários, manejando populações para solucionar problemas socioeconômicos, enquanto o termo *assentamento rural* serve para designar a transferência e alocação de certo número de famílias de trabalhadores rurais com recursos fundiários insuficientes para sua sobrevivência em algum território rural específico (TERRA, 2019).

O projeto de assentamento é um conjunto de ações em áreas destinadas à reforma agrária, planejadas, de natureza interdisciplinar e multisetorial, integradas ao desenvolvimento territorial e regional, definidas com base em diagnósticos precisos acerca do público beneficiário e das áreas a serem trabalhadas, orientadas para utilização racional dos espaços físicos e dos recursos naturais existentes, objetivando a implementação dos sistemas de vivência e produção sustentáveis na perspectiva do cumprimento da função social da terra e da promoção econômica, social e cultural do trabalhador rural e de seus familiares (INCRA, 2004).

A criação de assentamentos é feita por meio de publicação de uma portaria, constando os dados do imóvel, capacidade estimada de famílias, nome do projeto de assentamento e próximos passos para sua implantação. Além disso, podem ser divididos em dois grupos: os criados por meio de obtenção de terras pelo INCRA, denominados projetos de assentamento, que incluem os ambientalmente diferenciados e o projeto descentralizado de assentamento sustentável; e os implantados por instituições governamentais e reconhecidos pelo INCRA para acesso a algumas políticas públicas do Programa Nacional de Reforma Agrária (INCRA, 2023).

2.3.5. Terras Públicas Não Destinadas

Os problemas fundiários do Brasil datam da chegada dos europeus em terra brasileiras e da tentativa de implantação de normas jurídicas portuguesa em sua colônia ultramarina (FREIRIA, 2015). A concessão de terras se dava conforme os interesses econômicos da coroa portuguesa, que buscava particulares (HUGUENIN; MEIRELLES, 2022). Em 1850, a Lei nº 601, a chamada Lei de Terras, foi publicada com o objetivo de dar uma organização às terras brasileiras. Essa lei discriminou terras devolutas como aquelas que não se achavam aplicadas a nenhum uso público, não se achavam em domínio particular, não se acharem dadas por concessões e não estarem ocupadas (NAKAMURA, 2017).

No período imperial, as terras devolutas eram consideradas aquelas desocupadas ou devolvidas à coroa de Portugal, enquanto no período republicano, essas terras podiam ser ocupadas desde que não pertencessem ao particular (ARAÚJO; TÁRREGA, 2011). Atualmente, no Brasil, apesar de controvérsias jurídicas e doutrinárias, não há o que se falar em posse de terras públicas (BARRETO, 2012). De fato, a Constituição Federal de 1988 afirma que os imóveis públicos não serão adquiridos por usucapião, e que a destinação de terras públicas e devolutas será compatibilizada com a política agrícola e com o plano nacional de reforma agrária, sendo que a alienação ou concessão de terras públicas superiores a 2.500 hectares dependerá de aprovação do Poder Legislativo, excetuando-se, porém, alienações ou concessões de terras públicas para reforma agrária (BRASIL, 1988).

Terras públicas não destinadas caracterizam-se como áreas públicas as quais não foram atribuídas oficialmente pelo poder público nenhum propósito definido e podem ser federais, estaduais e municipais (ALECIO; COSTA, 2023). Essas terras não são classificadas como reservas indígenas, florestas públicas, unidades de conservação, áreas de fronteira, matinha ou reservadas à administração militar (SILVEIRA; WIGGERS, 2013). Um elemento de destaque no conjunto de terras públicas são as florestas públicas, caracterizadas como florestas, naturais ou plantadas, localizadas nos diversos biomas brasileiros, em bens sob o domínio da União, dos estados, dos municípios, do Distrito Federal ou das entidades da administração indireta (BRASIL, 2006).

As florestas públicas federais são classificadas em três tipos: florestas públicas do tipo A, aquelas destinadas à proteção e conservação do meio ambiente ou uso de comunidades tradicionais; florestas públicas do tipo B, localizadas em áreas públicas arrecadadas pelos entes da federação que ainda não foram objeto de destinação específica

por parte do órgão gestor da terra pública; e florestas públicas do tipo C, aquelas em áreas de dominialidade indefinida, ou seja, terras devolutas (ARAÚJO, 2008).

A Lei nº 11.284, de 2 de março de 2006, que dispõe sobre a gestão de florestas públicas para produção sustentável e dá outras providências, instituiu o Serviço Florestal Brasileiro (SFB), o Cadastro Nacional de Florestas Públicas (CNFP) e o Fundo Nacional de Desenvolvimento Florestal (FNDF) (BRASIL, 2006). O Decreto nº 6.063, de 20 de março de 2007, que regulamenta a Lei nº 11.284, determina que as florestas públicas federais não destinadas a manejo florestal ou unidades de conservação estão impossibilitadas de conversão para uso alternativo do solo, até que haja recomendação de uso pelo Zoneamento Ecológico-Econômico e sua conversão seja justificada para fins de reforma agrária (BRASIL, 2007), o imóvel rural que não esteja cumprindo sua função social, e cuja utilização será definida em lei.

2.3.6. Propriedade Privada

A Lei nº 10.267, de 28 de agosto de 2001, estabeleceu a identificação do imóvel rural, sendo que a localização, os limites e as confrontações dos imóveis rurais serão obtidos a partir de memorial descritivo, assinado por profissional habilitado e com Anotação de Responsabilidade Técnica (ART), contendo as coordenadas dos vértices definidores dos limites dos imóveis rurais, georreferenciadas ao Sistema Geodésico Brasileiro e com precisão posicional a ser definida pelo INCRA (BRASIL, 2001). Para isso, o memorial descritivo de imóvel rural será processado por meio do Sistema de Gestão Fundiária (SIGEF).

O cadastro de imóveis rurais é realizado pelo INCRA, de caráter declaratório. O objetivo do sistema de registro de imóveis é oferecer segurança jurídica aos proprietários de imóveis rurais, assegurando acesso a políticas públicas, ao mesmo tempo em que possibilita o planejamento do uso e ocupação da terra, e o monitoramento da execução das leis ambientais no país (LASKOS; CAZELLA; MAY REBOLLAR, 2016).

O Incra é responsável pelo Sistema Nacional de Cadastro Rural (SNCR), banco de dados com armazenamento de informações de imóveis rurais brasileiros, e pelo Certificado de Cadastro do Imóvel Rural (CCIR), documento para a realização de transferência da titularidade do imóvel por venda, requerimentos administrativos ou judiciais de desmembramento, remembramento e retificação de área, processo de herança e obtenção de financiamento (ROSALEN; MUNHOZ; MARDEGAN, 2012).

A análise dos dados será automática pela SIGEF, sendo que sobreposições ou inconsistências impedirão a emissão da certificação. Além disso, poderá ser requerido pelo INCRA a análise dessas sobreposições e inconsistências (INCRA, 2013).

2.4. Sistema de Cadastro Ambiental Rural (CAR)

O Novo Código Florestal, em 2012, criou o Sistema de Cadastro Ambiental Rural (SICAR), no âmbito do Sistema Nacional de Informação sobre Meio Ambiente (SINIMA), registro público eletrônico de âmbito nacional, obrigatório para todos os imóveis rurais, com a finalidade de integrar as informações ambientais das propriedades e posses rurais, compondo base de dados para controle, monitoramento, planejamento ambiental e econômico e combate ao desmatamento (BRASIL, 2012). O Novo Código Florestal incorporou o conceito de pequena propriedade rural ou posse rural familiar, baseado na Lei nº 4.771, de 1965, como propriedades explorada mediante o trabalho pessoal do agricultor familiar e empreendedor familiar rural, incluindo os assentamentos e projetos de reforma agrária (LAUDARES et al., 2019).

Com o SICAR, pode-se acompanhar a regularização ambiental de parte do proprietário ou possuidor de imóvel rural, possibilitando o cadastro das áreas agrárias a fim de cadastramento da legislação ambiental (BARROSO; ALENCAR, 2014). O cadastro constitui-se em um levantamento de informações georreferenciadas do imóvel, com delimitação das áreas de proteção permanente (APP), reserva legal (RL), remanescentes de vegetação nativa, área rural consolidada, áreas de interesse social e de utilidade pública, com o objetivo de mapear digitalmente os valores das áreas para realizar o diagnóstico ambiental dos territórios brasileiros (D'AVILA, 2015).

O proprietário é obrigado a cadastrar a propriedade rural no SICAR, por meio da agência responsável estadual ou municipal, declarando os seguintes itens: identificação do proprietário; prova de posse do imóvel; e identificação da propriedade por meio da planta do terreno ou o memorial descritivo contendo ao menos uma indicação de coordenadas geográficas, seus perímetros, a localização da vegetação nativa remanescente, APP, áreas de uso restrito, áreas consolidadas e RL (LAUDARES et al., 2019).

Tais informações permitem variadas análises ambientais, como o monitoramento do território por meio de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento (SANTOS, 2018). Realizando seu cadastro, o proprietário cria condições para a

recuperação de áreas anteriormente desmatadas ilegalmente, contribuindo para a restauração do ecossistema (RODRIGUES; LUDWIG, 2016). No entanto, o SICAR possui problemas e desafios para avançar em sua efetividade: falta de recursos financeiros e humanos nas instituições públicas; falta de exigência de profissionais qualificados (LOPES et al., 2018); inserção de dados errados e imprecisos; devido à necessidade de os órgãos ambientais validarem as informações, a validação é lenta e custosa; e sobreposições e inconsistências por erros e por má-fé dos usuários (D'AVILA, 2015).

2.5. Landsat-Based Detection of Trends in Disturbance and Recovery (LandTrendr)

2.5.1. Algoritmo

O Landsat-based detection of Trends in Disturbance and Recovery (LandTrendr) é um conjunto de algoritmos criado por Kennedy et al. (2010) para detecção de tendências de perturbação e recuperação florestal utilizando séries cronológicas anuais do satélite Landsat. O LandTrendr realiza processamento e análise com o objetivo de capturar, com flexibilidade, tanto os eventos de desvios, considerados abruptos, caracterizados pela ocorrência de uma mudança persistente, diferente de uma mudança sutil ou de um ruído espectral, na trajetória temporal que afasta o sinal espectral de uma trajetória presumivelmente estável, quanto os eventos de tendências como os processos mais lentos em que ocorre separação dos sinais de duração mais longa (KENNEDY; YANG; COHEN, 2010).

O algoritmo possui uma estratégia baseada em uma segmentação temporal arbitrária em que se busca usar segmentos de linha reta para modelar os recursos importantes da trajetória e eliminar ruídos espectrais. O resultado da segmentação temporal é uma representação simplificada da trajetória espectral em que os pontos iniciais e finais dos segmentos são vértices cuja posição temporal e valor espectral fornecem as informações essenciais necessárias para produzir as trajetórias temporais de um pixel.

O LandTrendr desenvolve-se a partir de três abordagens principais. Em primeiro lugar, busca-se rastrear a mudança na cobertura ao longo dos anos, evitando-se capturar tendências intra-anuais ou dentro de um mesmo ano para evitar ruídos espectrais como nuvens, sombra ou alterações nas imagens do sensor, além dos ruídos decorrentes das lacunas na coleta de dados e ao ciclo de repetição do satélite Landsat de 16 dias, que não

demonstram de fato alguma mudança verdadeira na cobertura terrestre. Em segundo lugar, o algoritmo realiza análise puramente baseada em pixels. Várias imagens por ano podem ser fornecidas ao algoritmo, mas a trajetória temporal de cada pixel é construída a partir da série de melhores valores únicos para cada pixel em cada ano. Procura-se evitar os ruídos de nuvens, sombras de nuvens e lacunas causadas pela falha do corretor de linha de varredura do Landsat, em uma base pixel-a-pixel. Em terceiro lugar, os algoritmos permitem tanto a suavização temporal do ruído espectral em sinais de longa duração, caracterizando-se pela busca de tendências, quanto a captura não suavizada da mudança espectral para eventos abruptos, concebida para a busca de desvios.

O algoritmo utiliza uma estrutura baseada em pixels. Ele traça uma trajetória espectral desse pixel para análise de um período interanual (SANT'ANNA; FERRAZ; ALMEIDA, 2023), fazendo um registro histórico desse ponto (UNIVERSIDADE DE OREGON, 2023), como exemplificado na Figura 2.1.

A etapa do LandTrendr de pré-processamento começa pela seleção de imagens. O algoritmo seleciona um *stack* composto por múltiplas imagens a fim de aumentar a cobertura espacial de pixels úteis, ou seja, fazer uso de múltiplas imagens para escolher aquelas em que não haja nuvens ou sombras de nuvem. O algoritmo cataloga as informações relevantes de arquivo e processamento desses *stacks* em uma estrutura de metadados. O LandTrendr realiza uma correção geométrica desse *stack*, quando necessário, por meio da correção $\cos(\phi)$ (COST) de Chavez (CHAVEZ Jr., 1996) para remover a maioria dos efeitos atmosféricos de um *stack*. Todas as imagens restantes do *stack* são normalizadas para a imagem COST usando os algoritmos *Multivariate Alteration Detection and Calibration* (MADCAL) de Canty et al. (2008) (KENNEDY; YANG; COHEN, 2010).

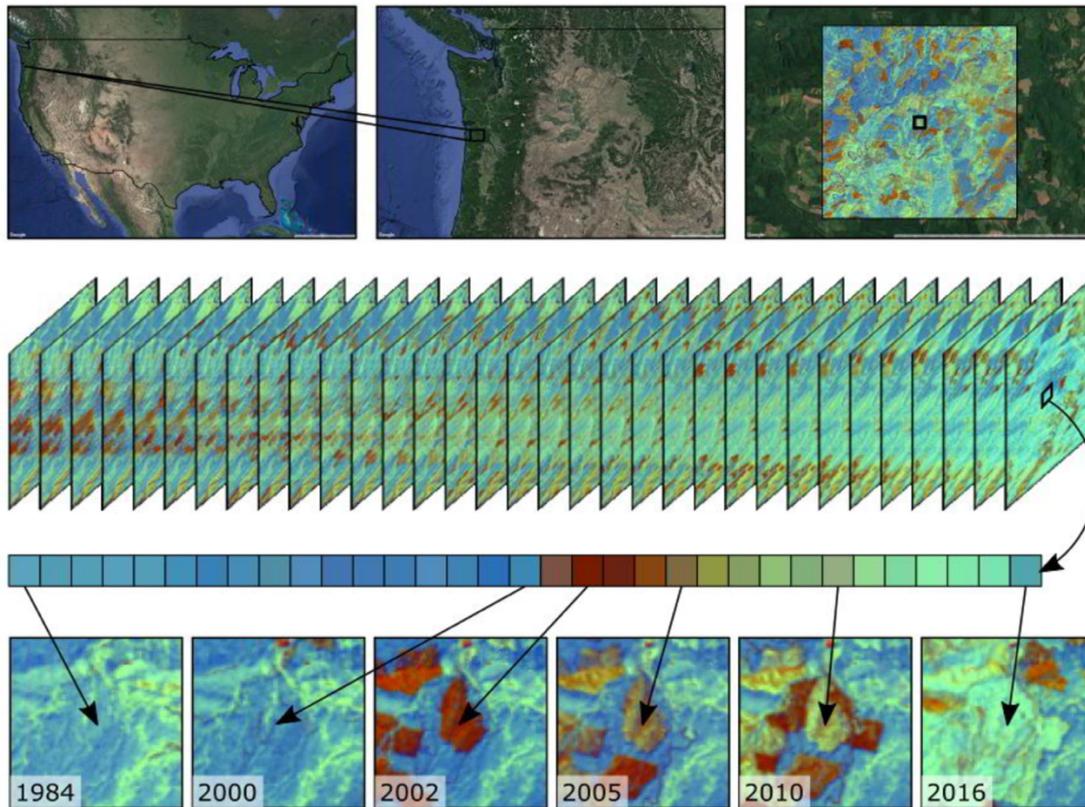


Figura 2.1. Registro histórico de um pixel. No exemplo, há a análise da história de um pixel de uma região nos Estados Unidos, demonstrando um período de relativa estabilidade, uma drástica e rápida perda de vegetação, e subsequente regeneração. Fonte: Universidade de Oregon (2023).

O algoritmo utiliza uma estratégia para identificar nuvens, fumaça, neve e sombras de nuvens, contrastando as imagens da série temporal com uma imagem de referência usando pontuações e, em seguida, definindo os limites de nuvens e sombras com base nessas pontuações. Após a normalização das imagens, os *stacks* são organizados para a segmentação da trajetória. As trajetórias espectrais são extraídas na escala de pixel e passadas para os algoritmos de segmentação de trajetória (KENNEDY; YANG; COHEN, 2010). Esses autores consideram a segmentação temporal a modelagem de uma série espectral de um pixel como uma sequência de segmentos de linhas retas que capturam as principais características das trajetórias, eliminando o ruído sem sacrificar os necessários detalhes. As etapas para a segmentação temporal consistem em identificar o modelo complexo maximalizado da trajetória; simplificar repetidamente o modelo; escolher o melhor modelo baseado em estatística de ajuste simples; e remover as mudanças consideradas ruídos, baseando-se em um critério de cobertura de vegetação (Figura 2.2).

O algoritmo LandTrendr busca primeiramente retirar o ruído, identificando os “picos” ou mudanças extremamente ríspidas que se diferenciam excessivamente na série temporal. Em seguida, o algoritmo busca possíveis vértices na trajetória. Um vértice de uma série temporal é a combinação (no ano, no valor espectral) que separa um distinto período antes e um distinto período depois. O passo seguinte diz respeito ao ajuste das trajetórias. Após a identificação desse primeiro possível conjunto de vértices, um segundo conjunto de ajustes é realizado para determinar os valores espectrais para cada vértice anual que resultará na melhor trajetória contínua. Conceitualmente, os algoritmos dos vértices no passo anterior focam-se no eixo X da série temporal que identificam os vértices dos anos, enquanto os algoritmos de ajuste de trajetória aperfeiçoam o eixo Y de valores espectrais, dado os pontos dos vértices do eixo X (Figura 2.3). Esses algoritmos de ajuste são responsáveis por suavizar o ruído na trajetória, mas ainda capturar, de forma confiável, as mudanças abruptas. Para cada modelo reduzido, a cálculo para execução da simplificação ocorre repetidas vezes.

A Figura 2.4 demonstra o uso do algoritmo LandTrendr em seis pixels no território dos Estados Unidos. Os segmentos de linha coloridos representam os valores espectrais do Índice de Queima por Razão Normalizada (NBR) em cada ano. Os segmentos de cor preta representam o modelo com os melhores algoritmos de ajustes para cada pixel.

2.5.2. Plataformas *Online*

O termo "plataforma *online*" tem sido usado para descrever uma série de serviços disponíveis na internet, incluindo mercados, mecanismos de busca, mídias sociais, lojas de conteúdo criativo, lojas de aplicativos, serviços de comunicação, sistemas de pagamento, serviços que compreendem a chamada economia "colaborativa" e muito mais (OECD, 2019). Uma “plataforma online” adota uma arquitetura computacional baseada na conectividade e no intercâmbio de dados e são baseadas em robustas infraestruturas, em geral, nomeadas como servidores “na nuvem” a partir de um modelo centralizado de fluxos informacionais e financeiros (ANDRÉA, 2020).

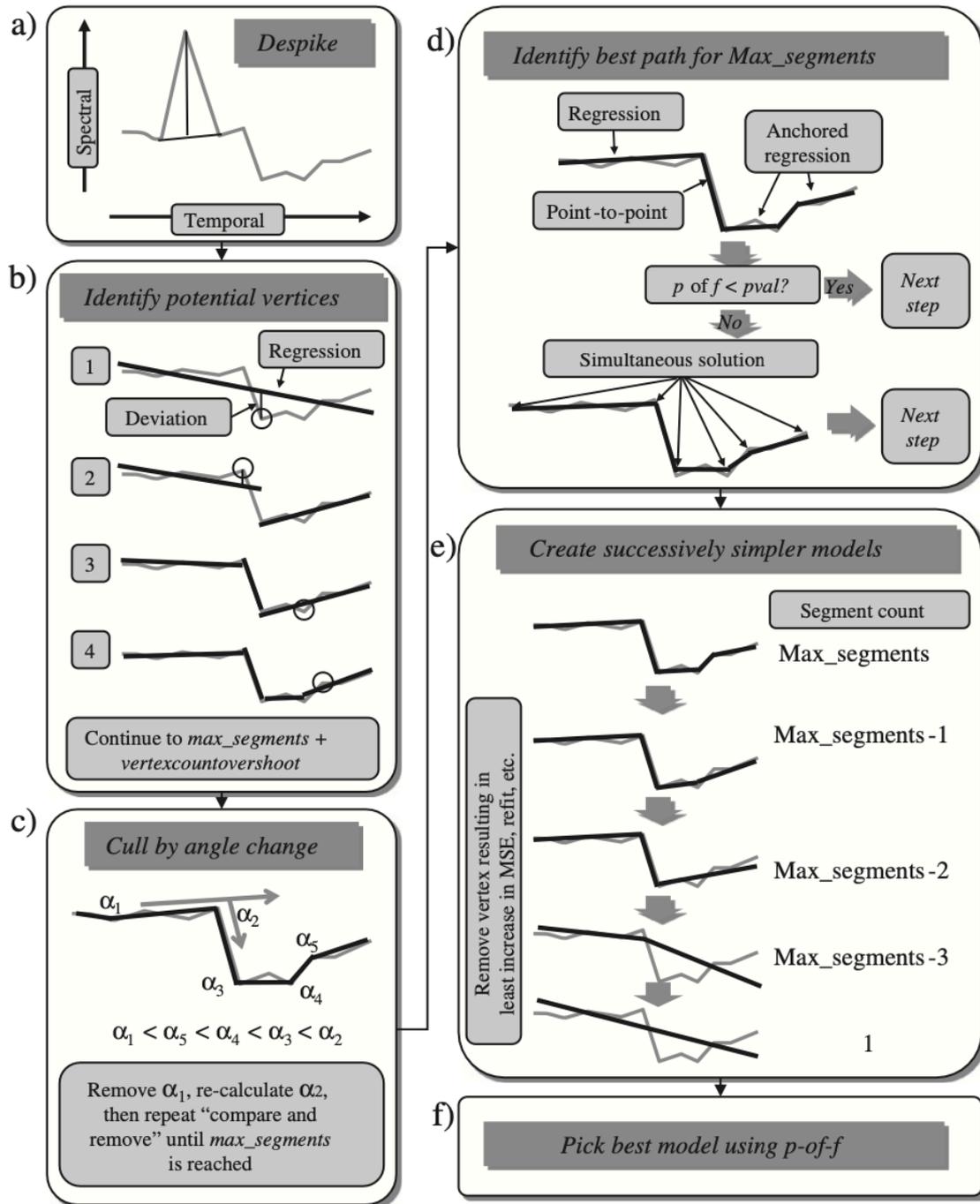


Figura 2.2. Processo de segmentação do LandTrendr. (a) Remoção dos picos efêmeros; (b) os vértices potenciais são identificados por meio de linhas de regressão simples, com mais vértices identificados do que o necessário; (c) os vértices em excesso são removidos por um novo processo de regressão; (d) um único caminho através dos vértices é escolhido usando regras de ajuste flexíveis; (e) os segmentos são removidos para criar modelos sucessivamente simplificados da trajetória; e (f) o modelo com o melhor ajuste, levando em conta o aumento da complexidade do modelo, é escolhido. Fonte: Kennedy; Yang; Cohen (2010).

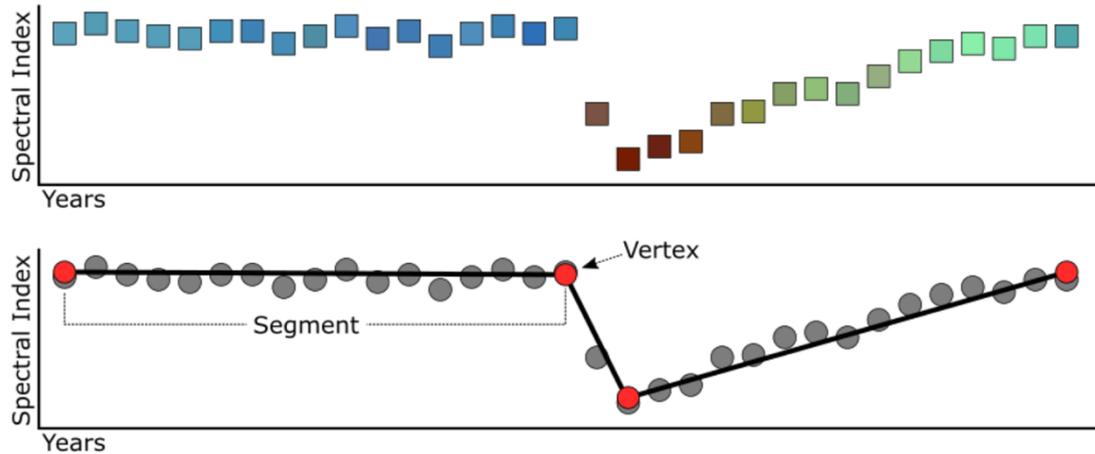


Figura 2.3. Segmentação da série temporal de um pixel. Os dados da imagem são reduzidos a uma única banda ou índice espectral e, em seguida, dividida em uma série de segmentos de linhas retas por meio da identificação dos vértices. Fonte: Universidade de Oregon (2023).

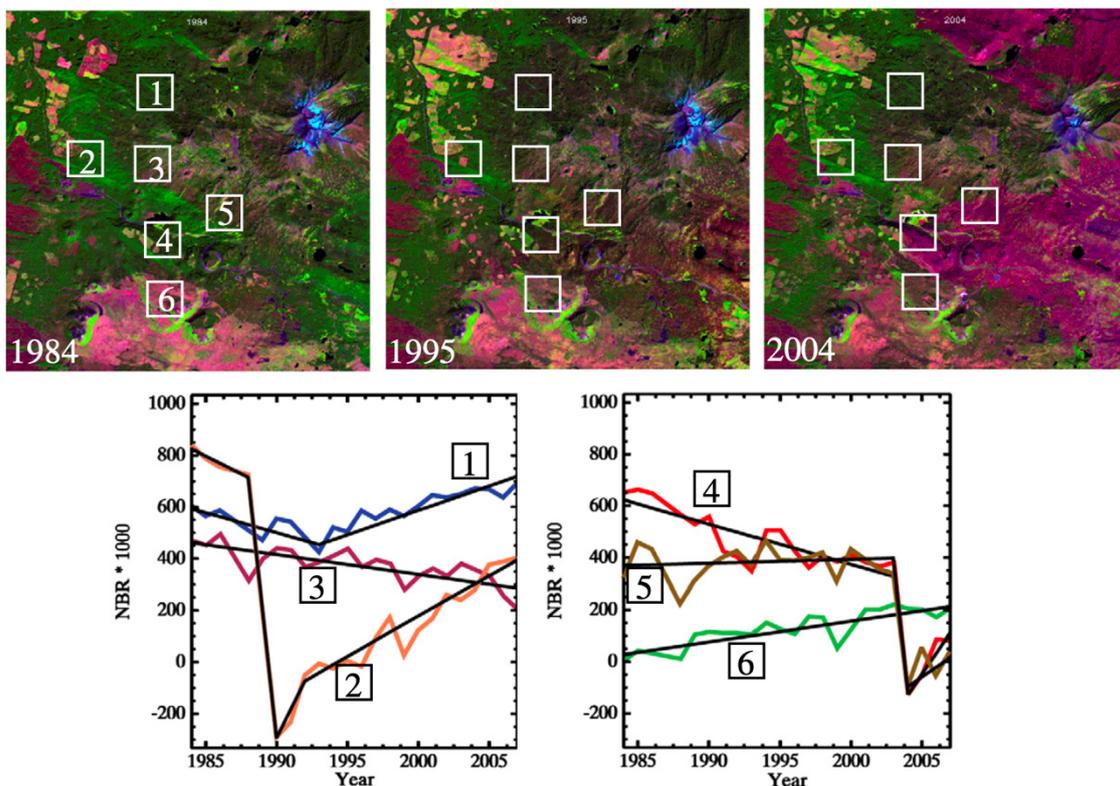


Figura 2.4. Resultados do algoritmo LandTrendr em um território no estado de Oregon, nos Estados Unidos, em que ocorreram perturbações por processos naturais e antropogênicos. As três imagens acima mostram as imagens do satélite Landsat (5R4G3B) adquiridas em 1984, 1995 e 2004. Os quadrados indicam seis diferentes áreas impactadas por diferentes ações naturais e antropogênicas. As áreas 1 e 3 apontam áreas afetadas por ações de insetos; a área 2 afetada por ações antrópicas de corte de árvores; a área 4 impactada primeiramente por insetos e depois pelo fogo, seguida por um processo de recuperação; a área 5 corresponde a uma área que teve um período de estabilidade, ou seja, sem distúrbios naturais ou antropogênicos, mas que logo após foi afetada pelo fogo;

e a área 6 indica uma área em processo de recuperação depois de ser impactada pelo fogo. As duas imagens abaixo demonstram as séries temporais realizadas pelo algoritmo nas seis áreas do estudo. As linhas coloridas indicam os valores espectrais adquiridos com o uso do Índice de Queima Por Razão Normalizada (NBR). As linhas pretas indicam a segmentação realizado pelo LandTrendr, ou seja, a escolha do modelo com os melhores algoritmos de ajustes para cada pixel. Fonte: Kennedy; Yang; Cohen (2010).

Neste trabalho, foi adotado o conceito de plataforma *online* como um serviço digital que facilita as interações entre dois ou mais conjuntos distintos, mas interdependentes, de usuários (organizações ou indivíduos) que interagem por meio do serviço via internet (OECD, 2019). As plataformas de computação em nuvem são formas eficientes de armazenar, acessar e analisar conjuntos de dados em potentes servidores, capazes de virtualizar supercomputadores para usuário, fornecendo infraestrutura, plataforma, serviços de armazenamento e pacotes de software (AMANI et al., 2020). Essas plataformas possuem importantes características em comum, incluindo o uso de tecnologias de informação e comunicação para facilitar as interações entre os usuários, a coleta e o uso de dados sobre essas interações e os efeitos de rede. Elas impulsionam a inovação e desempenham um papel fundamental nas sociedades digitais (OECD, 2019). Por um lado, elas se baseiam em um modelo centralizado de fluxos informacionais “na nuvem”. Por outro lado, existe grande interoperabilidade entre elas, podendo-se falar em um “ecossistema” de plataformas que se articula de modo distribuído e descentralizado (ANDRÉA, 2020). Plataformas online são estruturas bastante complexas e cujas funções e efeitos vem sendo continuamente estudados (GAO et al., 2024).

2.5.3. *Graphical User Interface*

No início da era dos computadores, utilizar um computador exigia um conhecimento profundo dos sistemas informáticos. Um usuário que somente desejava ou necessitava utilizar o sistema para um determinado fim deveria ter entendimento completo de todas as vertentes intrínsecas ao ambiente computacional inserido. Com a popularização da tecnologia da informação, com computadores acessíveis e disponíveis de forma abundante, a disseminação de computadores pessoais necessitava ajustar o uso deles para usuários finais. Dessa maneira, várias instituições voltaram seus centros de pesquisas para suprir essa demanda, de forma a permitir que usuários leigos façam uso dos sistemas computacionais complexos (BARRETO et al., 2018).

Dentro da tecnologia da informação, a interface pode ser considerada como o elemento do sistema computacional com a qual o usuário se comunica, ou seja, realiza as ações desejadas do sistema para receber seus resultados, os quais são interpretados pelo usuário que então define suas próximas ações (PRATES; BARBOSA, 2007). Um dos tipos de interface criados foi o *Graphical User Interface* (GUI) que utiliza elementos gráficos na interação humano-computador (BARRETO et al., 2018). Diversas plataformas permitem a criação e a modificação do GUI. Plataforma do *Google Earth Engine* permite a modificação de sua GUI, possibilitando a implementação de novos elementos gráficos e novas funcionalidades (GORELICK et al., 2017).

2.5.4. LandTrendr no Google Earth Engine (LG-GEE)

O LandTrendr foi implementado na plataforma *Google Earth Engine* em 2018 (KENNEDY et al., 2018). A implementação se deu por razões que inviabilizavam o uso do LandTrendr para grande quantidade de interessados. Em primeiro lugar, o código foi escrito em uma linguagem própria, cujo custo e curva de aprendizado eram impedimentos à acessibilidade. Em segundo lugar, o fluxo de trabalho para criar os *stacks* de imagens de séries temporais exigia um investimento significativo de tempo e pessoal no pré-processamento de imagens e no gerenciamento de dados antes que o algoritmo pudesse ser executado. Além disso, a execução do algoritmo em si exigia muito tempo de computação, geralmente de dois a três dias para uma única cena do satélite em um computador comum, dependendo da capacidade de processamento do computador. Esses obstáculos limitavam o algoritmo a usuários com recursos computacionais substanciais e experiência em sensoriamento remoto (KENNEDY et al., 2018).

Assim, para aumentar o acesso ao LandTrendr a uma comunidade mais ampla, Kennedy et al. (2018) implementaram o algoritmo no *Google Earth Engine*. Essa plataforma pode ser conceituada como uma plataforma de computação em nuvem estabelecida para armazenar e processar grande quantidade de dados para análise e tomada de decisão (MUTANGA; KUMAR, 2019). É uma plataforma gratuita que possuiu larga base de uso, acesso completo a vários bancos de dados de sensoriamento remoto, facilidade de processamento e manuseamento de séries temporais (KENNEDY et al., 2018). Outra vantagem da plataforma é que seu uso facilita a árdua tarefa de processamento de grande quantidade de imagens e dados que, de outra forma, necessitariam de de última geração, tecnologia muitas vezes fora do alcance de

pesquisadores e cientistas de nações em desenvolvimento (MUTANGA; KUMAR, 2019).

No entanto, a tradução de códigos científicos em um ambiente baseado em dados em nuvens requer muito cuidado na avaliação do código original da plataforma, além de necessitar modificações nesse mesmo código, atividades que necessitam de extremo cuidado e revisão por parte do pesquisador (KENNEDY et al., 2018). A Universidade de Oregon disponibiliza gratuitamente na internet (<https://emapr.github.io/LT-GEE/index.html>) um guia para a implementação dos algoritmos do LandTrendr no GEE (UNIVERSIDADE DE OREGON, 2023). Esta pesquisa utilizará esse guia e o Aplicativo UI LandTrendr Pixel Time Series Plotter, baseado no GEE, disponibilizado pela Universidade de Oregon (<https://emapr.github.io/LT-GEE/index.html>). A utilização do guia mostra-se útil, pois os *scripts* disponibilizados no GEE foram preparados pelos próprios autores do LandTrendr, poupando tempo na pesquisa e evitando, assim, qualquer erro de programação na preparação de um novo *script* para a pesquisa (KENNEDY et al., 2018).

2.5.5. *UI Application LandTrendr Pixel Time Series Plotter*

A Universidade de Oregon desenvolveu os seguintes aplicativos de interface do usuário para explorar dados de séries temporais LT-GEE: *UI LandTrendr Pixel Time Series Plotter*; *UI LandTrendr Change Mapper*; *UI LandTrendr Fitted Index Delta RGB Mapper*; *UI LandTrendr Time Series Animator*; e *UI LandTrendr Visualization and Download Tool*. Essa pesquisa usa apenas o aplicativo *UI LandTrendr Pixel Time Series Plotter* disponível no sítio eletrônico <https://emaprlab.users.earthengine.app/view/lt-gee-pixel-time-series>. O *UI LandTrendr Pixel Time Series Plotter* traça a fonte de reflectância da superfície do Landsat e o índice ajustado pelo LandTrendr para um local selecionado pelo usuário. Seus *scripts* foram concebidos para explorar e visualizar o espaço espectral-temporal de um pixel para comparar a eficácia de uma série de índices a fim de identificar mudanças no solo e para parametrizar o LandTrendr na região de estudo do usuário (UNIVERSIDADE DE OREGON, 2023). A interface é mostrada na Figura 2.5.

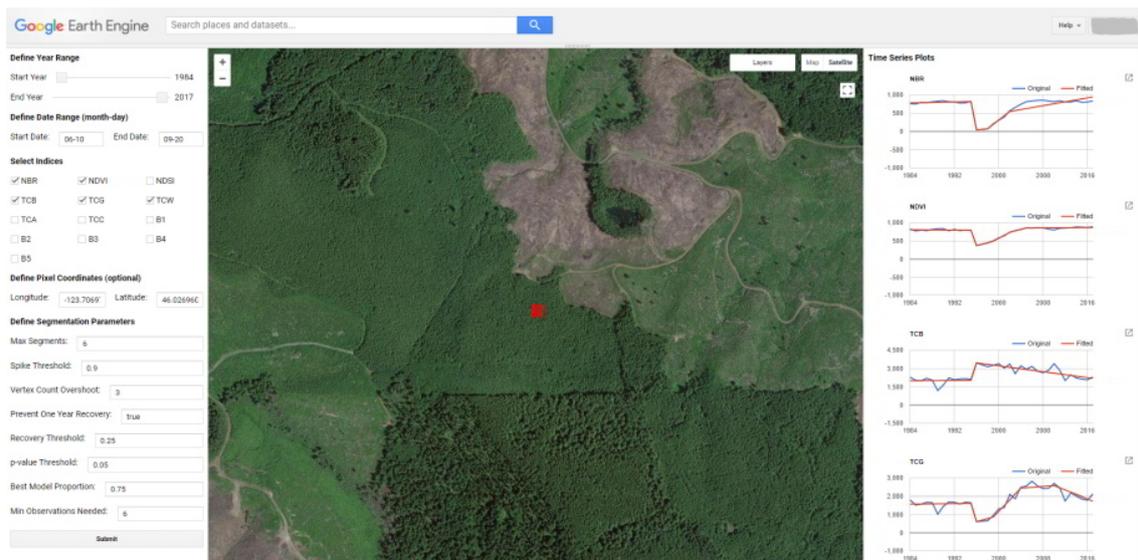


Figura 2.5. Interface do UI LandTrendr Pixel Time Series Plotter. Fonte: Universidade de Oregon (2023).

No painel esquerdo, acima, o usuário deve definir um intervalo de anos e datas para gerar compostos anuais de refletância de superfície. Abaixo das datas, o usuário deve escolher as bandas espectrais, o índice de queima por diferença normalizada (NBR), o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI); o índice de vegetação realçado (EVI); o índice de umidade por diferença normalizada (NDMI); e ainda as funções *Tasseled Cap* (TC) de coeficientes de brilho (TCB), *Greenness* (TCG) e umidade (TCW), e a função *Tasseled Cap Angle* (TCA).

O usuário tem a opção de definir um conjunto de coordenadas geográficas (latitude e longitude), para visualizar a série temporal clicando no mapa. Por último, na parte inferior do painel esquerdo, o usuário pode definir os parâmetros de segmentação do LandTrendr, especificados no guia disponibilizado pela Universidade do Oregon (<https://emapr.github.io/LT-GEE/lt-gee-requirements.html#lt-parameters>). O painel direito mostra os gráficos de dados de séries temporais para todos os índices selecionados pelo usuário. As linhas azuis indicam os valores espectrais adquiridos com o índice escolhido (*Original*), enquanto as linhas vermelhas indicam a segmentação realizado pelo LandTrendr, ou seja, a escolha do modelo com os melhores algoritmos de ajustes para cada pixel (*Fitted*).

2.5.6. Sistema de Análise Temporal da Vegetação (SATVeg)

O Sistema de Análise Temporal da Vegetação (SATVeg) é uma ferramenta web desenvolvida pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), cujo objetivo é a análise de perfis temporais de índices de vegetação que evidenciam as variações da biomassa vegetal na superfície terrestre ao longo do tempo, auxiliando as atividades de monitoramento agrícola e ambiental (EMBRAPA AGRICULTURA DIGITAL, 2024). O SATVeg permite gerar perfis espectro-temporais para qualquer localização geográfica da América do Sul (SPERANZA et al., 2020). O usuário também pode inserir arquivos em formato *shapefile* da área de estudo desejada (MIRANDA; ALVES, 2022).

O SATVeg disponibiliza séries históricas dos índices de vegetação NDVI e EVI derivados das imagens do sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). As séries temporais dos índices de vegetação fazem parte da coleção 6 dos produtos MOD13Q1 derivado do satélite Terra, lançado em 18 de fevereiro de 2000 e MYD13Q1, derivado do satélite Aqua, lançado em 04 de julho de 2002. O NDVI e o EVI são disponibilizados em composições de 16 dias, com resolução espacial de 250 m (EMBRAPA AGRICULTURA DIGITAL, 2024).

As composições são construídas a partir dos pixels de melhor qualidade radiométrica e geométrica no período de 16 dias, ou seja, aqueles com menor presença de nuvens e menor ângulo de visada. O satélite Terra tem uma órbita solssíncrona descendente quase polar, programada para cruzar o equador aproximadamente às 10h30, horário local, enquanto o satélite Aqua tem uma órbita ascendente quase polar, programada para cruzar o equador aproximadamente às 13h30, horário local. Esses produtos são gerados e distribuídos em blocos adjacentes não sobrepostos de 1200 × 1200 km. As séries temporais completas de ambos os produtos foram baixadas e as camadas NDVI, EVI e *Pixel Reliability* foram extraídas para cada data. A camada de *Pixel Reliability* fornece informações sobre a confiabilidade da qualidade dos pixels do MODIS em quatro níveis: bom, marginal, neve/gelo e nublado (ESQUERDO et al., 2020).

O SATVeg realiza a reconstrução da série temporal por meio de um procedimento que envolve duas etapas. A primeira etapa é a pré-filtragem, um método de reconstrução de séries temporais em tempo real baseado na interpolação bilinear para substituir dados ausentes ou pixels de nuvens e neve sinalizados pelo produto *Pixel Reliability*. A segunda etapa é a filtragem, outra reconstrução de série temporal em tempo real, podendo ser aplicada à série temporal pré-filtrada ou à série original (ESQUERDO et al., 2020).

O SATVeg oferece três métodos de filtragem com diferentes níveis de complexidade. O primeiro método é o FlatBottom (WARDLOW; KASTENS; EGBERT,

2006), o qual desenvolve uma interpolação bilinear de valores inconsistentes, que apresentam uma queda seguida de um aumento dos valores dos índices vegetativos. O segundo método é o Wavelet Coiflet4 (SAKAMOTO et al., 2005). Os filtros denominados *Wavelet* são definidos como ondas pequenas (ondaletas) que servem de base para representar e descrever outras funções. A transformada de Wavelet possibilita decompor uma série temporal em diferentes escalas para obtenção de informações na frequência e no tempo, a fim de eliminar as variações bruscas nos valores espectrais dos índices de vegetação, resultando em curvas suavizadas que auxiliam o entendimento da dinâmica temporal. O terceiro método é o Savitzky-Golay (SAVITZKY; GOLAY, 1964), que é um filtro de suavização, baseado em uma janela móvel, que utiliza ajuste linear de mínimos quadrados por meio de sucessivas equações polinomiais. Quanto maior a janela, maior o efeito de suavização (EMBRAPA AGRICULTURA DIGITAL, 2024).

A interface do usuário é dividida em duas partes: mapa e gráfico. O mapa apresenta as imagens de alta resolução espacial da plataforma Google Maps, para que o usuário identifique os pontos de interesse. Porém, os valores dos índices de vegetação são obtidos por meio do sensor MODIS, onde cada pixel ou célula tem o tamanho de 250 × 250 metros (Figura 2.6).

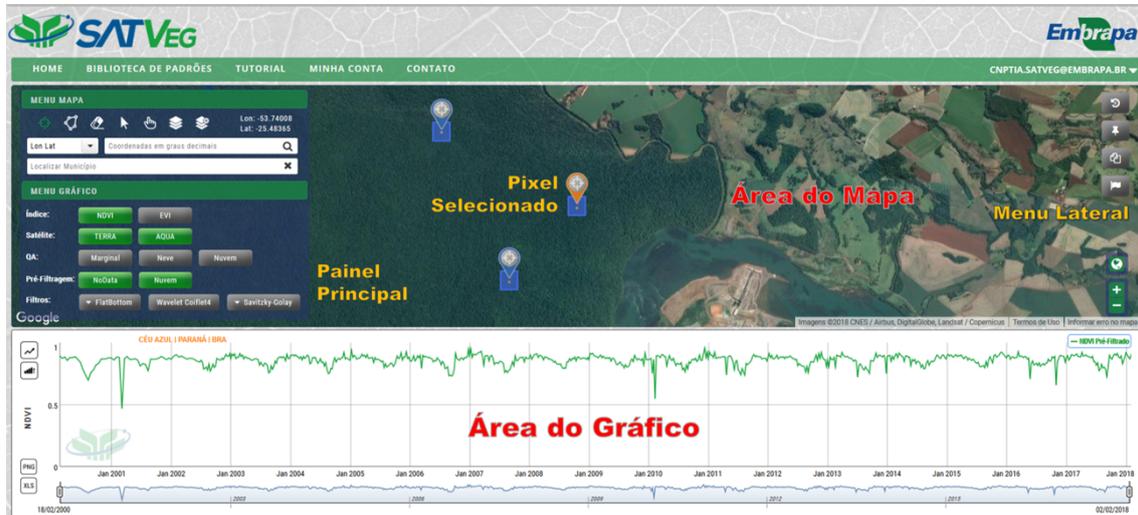


Figura 2.6. Interface da plataforma SATveg. **Fonte:** EMBRAPA AGRICULTURA DIGITAL (2024).

A interface possui um menu de opções do mapa em que o usuário pode escolher entre: latitude e longitude ou longitude e latitude; digitar as coordenadas em graus decimais; ou digitar o nome do município. Há também o menu gráfico com as opções

NDVI e/ou EVI; Terra e/ou Aqua; *quality assurance*: marginal, neve e/ou nuvem; pré-filtragem: nodata e/ou nuvem; e filtros: Flatbottom, Wavelet Coiflet4 ou Savitzky-Golay.

Ainda no menu do mapa, o usuário possui as seguintes opções: selecionar pixels a partir de pontos; selecionar pixels a partir de polígonos desenhados na tela; limpar os pontos selecionados com um clique do mouse; obter informações sobre pontos ou polígonos mostrados no mapa; calcular a média de polígonos importados pelo usuário a partir de arquivos vetoriais; alterar camada do Google Maps e sobrepor limites políticos no mapa; e inserir camada *Web Map Service* (WMS) (Figura 2.7). Os valores de NDVI e EVI são exibidos no gráfico na escala entre 0 e 1 (eixo Y). É nessa faixa em que a maior parte dos comportamentos dos alvos agrícolas e naturais se concentra, desde o solo exposto até altos valores de biomassa vegetal, identificados em cultivos agrícolas e áreas florestadas.

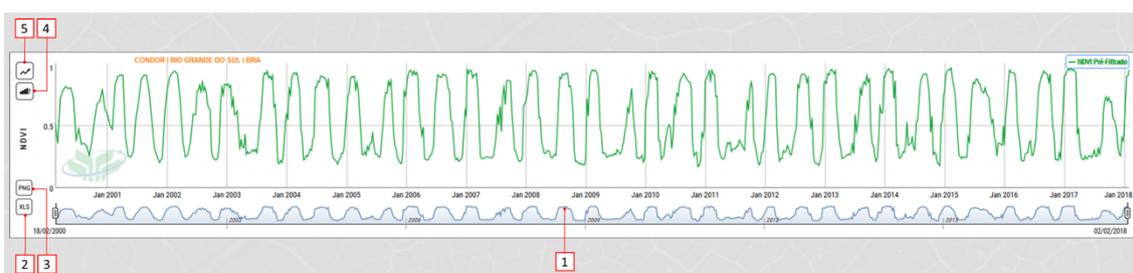


Figura 2.7. Gráfico da plataforma SATveg. O gráfico apresenta as seguintes funcionalidades: (1) seletor de *zoom*: por padrão, o gráfico do SATVeg exibe a série temporal completa, mas o usuário pode limitar a visualização a um determinado período de interesse utilizando essa funcionalidade; (2) função para exportar os valores exibidos no gráfico em uma planilha Excel; (3) função para exportar o gráfico em formato PNG; (4) função para reescalonar o eixo Y entre -0,3 e 1, utilizada em regiões cobertas com neve ou corpos d'água; e (5) função para restaurar o eixo Y para os valores originais (entre 0 e 1). Fonte: EMBRAPA AGRICULTURA DIGITAL (2024).

O portal do SATVeg ainda apresenta uma biblioteca de padrões em que são exibidos exemplos de gráficos de trajetórias temporais de culturas como pastagem cultivada, floresta ombrófila densa, e atividades como agricultura e desmatamento (Figura 2.8).

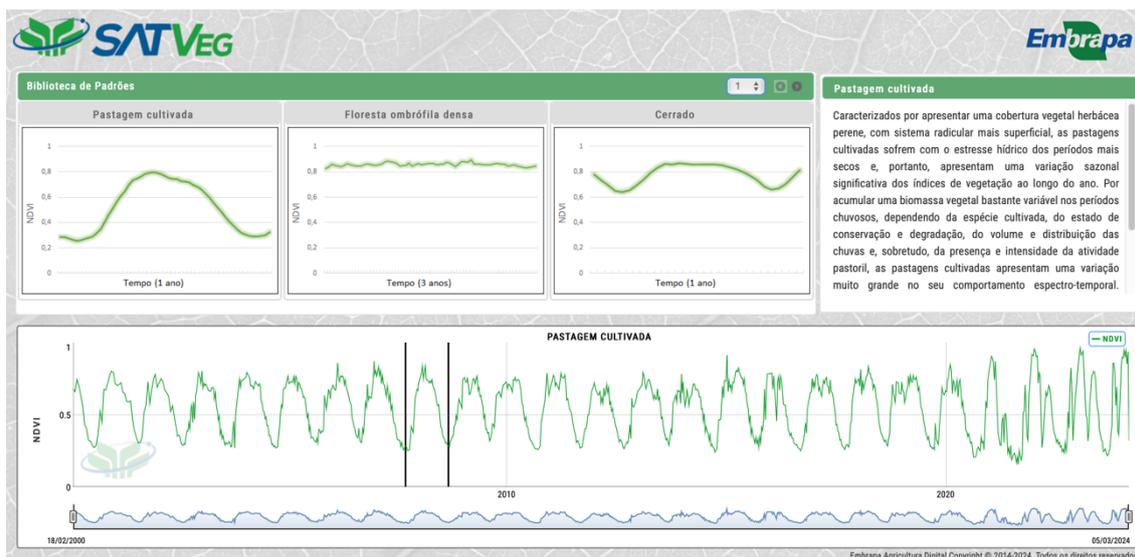


Figura 2.8. Biblioteca de padrões espectrais da plataforma SATveg. Fonte: EMBRAPA AGRICULTURA DIGITAL (2024).

2.5.7. Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil (MapBiomias)

O Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil (MapBiomias) é uma iniciativa criada em 2015 pelo Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), da organização não-governamental Observatório do Clima como uma metodologia rápida e de baixo custo para classificar o uso e a cobertura da terra nas últimas décadas (NEVES et al., 2020).

A iniciativa vem disponibilizando dados com classificações estruturadas e assertivas sobre o uso e a cobertura da terra, por meio de uma rede colaborativa de equipes especializadas por biomas ou tipologias específicas (FREITAS; CAVALCANTI; BRAZ, 2023). Os mapas são elaborados a partir da cooperação dessas equipes com a plataforma *Google Earth Engine* estabelecendo um sistema aberto e multiplicável, adaptado também a outros países (FAUSTINO; LIMA, 2022). Utiliza imagens de satélites do Landsat 5, 7, 8 e 9, com resolução espacial de 30 metros (LUCAS et al., 2021).

O projeto do MapBiomias é organizado por biomas (Amazônia, Cerrado, Caatinga, Mata Atlântica, Pantanal e Pampa), e temas como mineração, infraestrutura urbana, zona costeira, pastagem, agricultura e silvicultura, irrigação, camadas de infraestrutura, desmatamento e vegetação secundária (MAPBIOMAS, 2022). O esquema de classificação utilizado é um sistema hierárquico com uma combinação de classes de uso e cobertura da terra compatíveis com os sistemas de classificação da Organização das

Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). O sistema de classificação é hierárquico, sendo suas classes divididas em níveis e subníveis, combinando os diferentes métodos. Além disso, esse sistema pode ser vinculado a outros sistemas de classificação internacionais e nacionais (SOUZA et al., 2020).

O MapBiomas elaborou oito conjuntos de mapas digitais anuais de cobertura e uso da terra, chamados de Coleções, sendo que o seu período de análise constitui o período de 1985 até 2022 (MAPBIOMAS, 2023). Essa coleção compreende o período de 1985 a 2022 e é baseada no algoritmo de classificação Random Forest para todos os biomas e para os temas Zona Costeira, Área Urbana, Pastagem e Agricultura, exceto Aquicultura, Mineração, Irrigação, Arroz, Citrus e Óleo de Palma, que aplicam *U-Net convolutional neural networks* em sua classificação (SOUZA; AZEVEDO, 2023).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Área de Estudo

A delimitação espacial da análise é o município de Altamira, no estado do Pará (Figura 3.1). Sua área territorial é de 159.533,306 km², população residente de 126.279 pessoas, tendo uma densidade demográfica de 0,79 habitantes por km², de acordo com o Censo Demográfico de 2022 (IBGE, 2023). O município está localizado no oeste do estado do Pará, distante 512 km de Belém, capital do estado (JOHANSEN; CARMO, 2012).

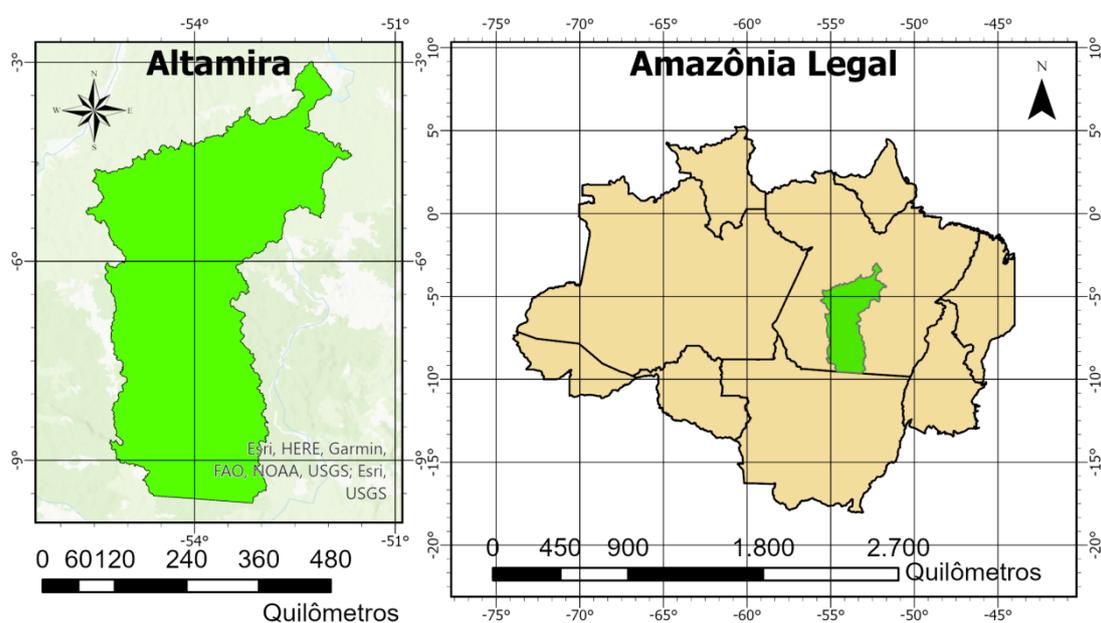


Figura 3.1. Mapa de localização da área de estudo, o município de Altamira, no estado do Pará.

Altamira está inserido no bioma Amazônia, com ampla extensão territorial coberta por floresta equatorial densa com árvores de grande porte e vegetação emergente. Conta com rica e diversa variedade biológica de fauna e flora, apresentando também outras fisionomias de vegetação secundária. Seu principal rio é o Xingu, com aproximadamente 1.400 km de extensão. Além disso, possui diversos igarapés, ilhotas, praias de água doce, serras, cachoeiras e furos (ROMÃO et al., 2017a).

A temperatura média anual é de 26 °C, com máxima de 31 °C e mínima de 21,9 °C, com umidade relativa média mensal de 84%. A precipitação média mensal é de 55,5

mm de julho a novembro, podendo alcançar 287,1 mm de dezembro a junho (JOHANSEN; CARMO, 2012). Altamira possui classes de solos diversificadas, como Podzólico Vermelho-Amarelo, Latossolo Amarelo e Latossolo Vermelho-Amarelo, sendo que os solos possuem características de textura média e argilosa. Outros tipos menos comuns na região são os solos aluviais eutróficos e distróficos e os solos litólicos distróficos (SILVA et al., 2020).

O município foi fundado em 1883, tendo seu povoamento e ocupação começado às margens do rio Xingu (PREFEITURA MUNICIPAL DE ALTAMIRA, 2023). Na década de 1970, o município teve um grande aumento populacional e migratório decorrente da construção da rodovia Transamazônica (ROMÃO et al., 2017a). Nessa época, a base produtiva da região era baseada na cultura de arroz, milho, feijão e mandioca, subsidiada com créditos governamentais com baixos juros, e pimenta-do-reino e cacau, incentivados por programas de incentivo fiscais (SILVA; OLIVEIRA; SANTANA, 2017).

Em meados da década de 1980, a pecuária passou a predominar como base econômica. Dessa época em diante, a população de Altamira passou por um incremento vertiginoso, acompanhado pelo crescimento desorganizado e sem planejamento de sua área urbana (JOHANSEN; CARMO, 2012). Outro ponto de destaque foi a recente construção da usina hidrelétrica de Belo Monte e seus impactos socioambientais positivos e negativos no município (SILVA et al., 2020).

A dinâmica do desmatamento de Altamira coincide com a evolução do desmatamento da floresta amazônica. De acordo com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), o total de áreas desmatadas na Amazônia brasileira aumentou de 15,2 milhões de hectares em 1978 para 60,3 milhões de hectares em 2001 (MARGULIS, 2004). Esse desmatamento vem crescendo continuamente desde 1991, influenciado pelas forças produtivas e pela economia (FEARNSIDE, 2006). Dentre os fatores que impactam no aumento do desmatamento da floresta, destaca-se a conversão do uso e da cobertura florestal para atividades econômicas na agricultura e na pecuária, tanto em pequenas quanto em grandes áreas (MARGULIS, 2004). Avaliaram-se uma área aproximada de 721 mil km² de conversão de floresta para agropecuária entre 1985 e 2019 (FERREIRA; CORLETO, 2023).

Os índices de desmatamento no município de Altamira constituem-se com um dos mais altos do país. O projeto PRODES, criado pelo governo federal para realizar o monitoramento por satélite do desmatamento na Amazônia Legal por meio de produção

de taxas anuais de desmatamento na região desde 1988. De acordo com os dados do PRODES, Altamira possui atualmente as maiores taxas de desmatamento acumulado dentre os municípios da Amazônia Legal (Figura 3.2).



Figura 3.2. Municípios da Amazônia Legal com os maiores incrementos de desmatamento acumulado (km²) no período 2008–2023. Fonte: PRODES.

3.2. Materiais

O principal material utilizado foram os arquivos no formato vetorial (*shapefile*) de 2.060 áreas embargadas no período 2003–2021 no município de Altamira, Pará (Figura 3.3), retirados do geoportal do Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (<http://siscom.ibama.gov.br>).

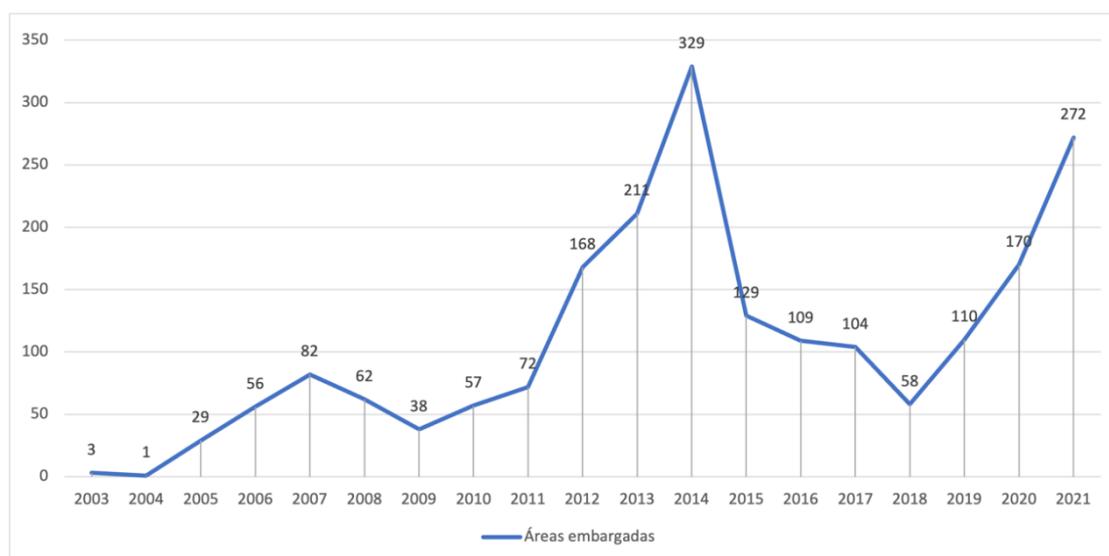


Figura 3.3. Número de áreas embargadas pelo Ibama no município de Altamira, Pará, no período de 2003 a 2021. Fonte: O Autor.

Na Figura 3.4, é mostrada a distribuição espacial desses embargos no referido município, enquanto as Tabelas 3.1 e 3.2 mostram as estatísticas descritivas das áreas embargadas e o número de embargos em diferentes domínios territoriais.

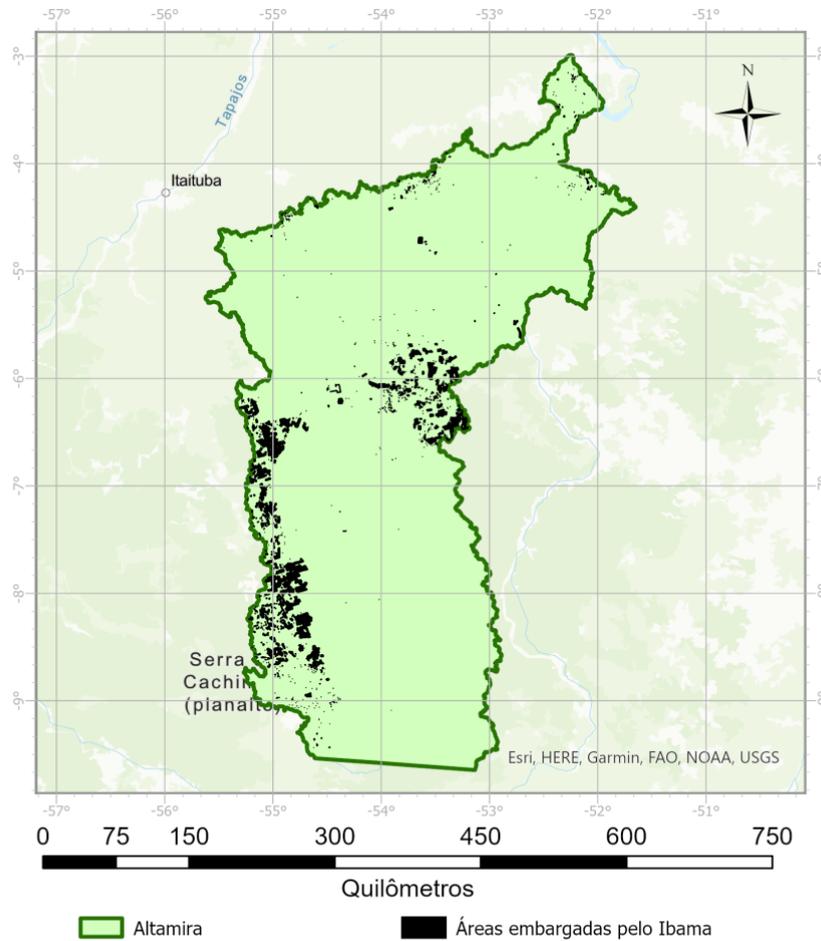


Figura 3.4. Distribuição espacial de áreas embargadas pelo Ibama no município de Altamira, Pará, no período 2003-2021. Fonte: O Autor.

Tabela 3.1. Estatística descritiva sobre 2.060 áreas embargadas pelo Ibama no município de Altamira, Pará, no período 2003-2021. Fonte: O autor.

Parâmetro estatístico	Área (ha)
Média	176
Mediana	32
Moda	4
Menor área embargada	0,0048
Maior área embargada	13.973
Área total	361.698

Tabela 3.2. Distribuição de embargos no município de Altamira, Pará, no período 2003-2021, segundo as cinco diferentes dominialidades territoriais encontradas nesse município. Nota: O município não possui terras quilombolas delimitadas. Fonte: O Autor.

Dominialidade Territorial	Número de embargos	Fonte
Terras indígenas	201	Funai
Unidades de conservação	508	ICMBio
Assentamentos	401	Incrá
Terras públicas não destinadas	915	CNFP
Propriedades privadas	1742	SFB

3.3. Proposta Metodológica

A proposta metodológica foi baseada na aplicação do algoritmo LT-GEE para os dados disponibilizados nas plataformas SATVeg e MapBiomas. Foram sorteadas 50 áreas embargadas no município de Altamira (Figura 3.5). A busca pelas amostras se deu por meio de latitudes e longitudes que constam nas tabelas de atributos dos arquivos vetoriais (*shapefiles*) das áreas embargadas (Tabela 3.3).

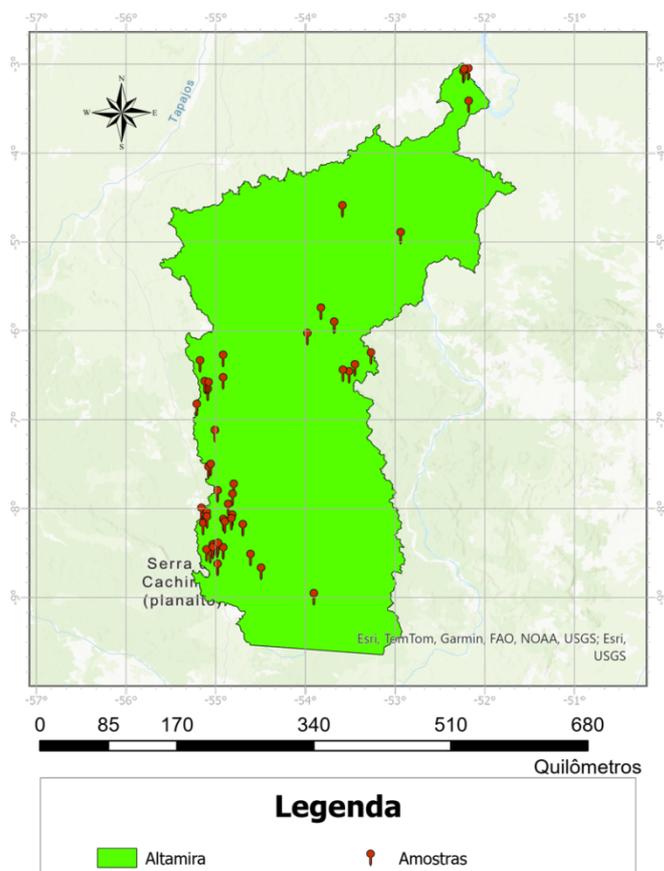


Figura 3.5. Localização das áreas embargadas pelo Ibama para amostra.

Tabela 3.3. Coordenadas geográficas das 50 áreas embargadas pelo Ibama selecionadas para este estudo.

Amostra	Latitude	Longitude
1	-7,931806	-54,978556
2	-8,617778	-55,061667
3	-9,088889	-53,906111
4	-5,876667	-53,826944
5	-6,406944	-54,918056
6	-6,5925	-53,512528
7	-3,215278	-52,239167
8	-3,191389	-52,228889
9	-66,163612	-55,211666
10	-6,3875	-53,283889
11	-6,66	-54,918056
12	-8,5375	-55,024444
13	-8,554167	-54,986111
14	-6,575	-53,581111
15	-6,151444	-53,967028
16	-8,595556	-55,101667
17	-7,931806	-54,978556
18	-7,665556	-55,081389
19	-7,86109917	-54,79677498
20	-8,299722	-55,141667
21	-8,537611	-55,04785
22	-7,642167	-55,056
23	-3,551944	-52,198333
24	-8,279417	-54,895944
25	-6,78825	-55,084806
26	-6,469167	-55,174444
27	-8,205556	-54,815556
28	-4,729167	-53,59198312
29	-6,028889	-53,683611
30	-6,164417	-53,970278
31	-8,804722	-54,494167
32	-8,253889	-54,914722
33	-7,253611	-55,009167
34	-8,5725	-54,916389
35	-8,173222	-55,099583
36	-8,244722	-54,825
37	-8,646389	-54,6175
38	-6,164861	-53,4319
39	-6,70361114	-55,12297576
40	-7,969167	-54,811667
41	-8,7575	-54,978889
42	-6,713361	-55,079194
43	-6,71156342	-55,11278035
44	-8,568333	-55,031389
45	-8,522778	-54,975556
46	-5,023889	-52,93838073
47	-8,3125	-54,697778
48	-8,08376565	-54,86093089
49	-8,225278	-55,097222
50	-8,128056	-52,183333

Dessas 50 amostras, 19 localizam-se dentro de terras públicas sem destinação, sete em unidades de conservação, uma em terra indígena, nove em assentamentos rurais e

cinco não estão localizadas em nenhum dos tipos fundiários e nem em propriedades rurais (Figuras 3.6 e 3.7).

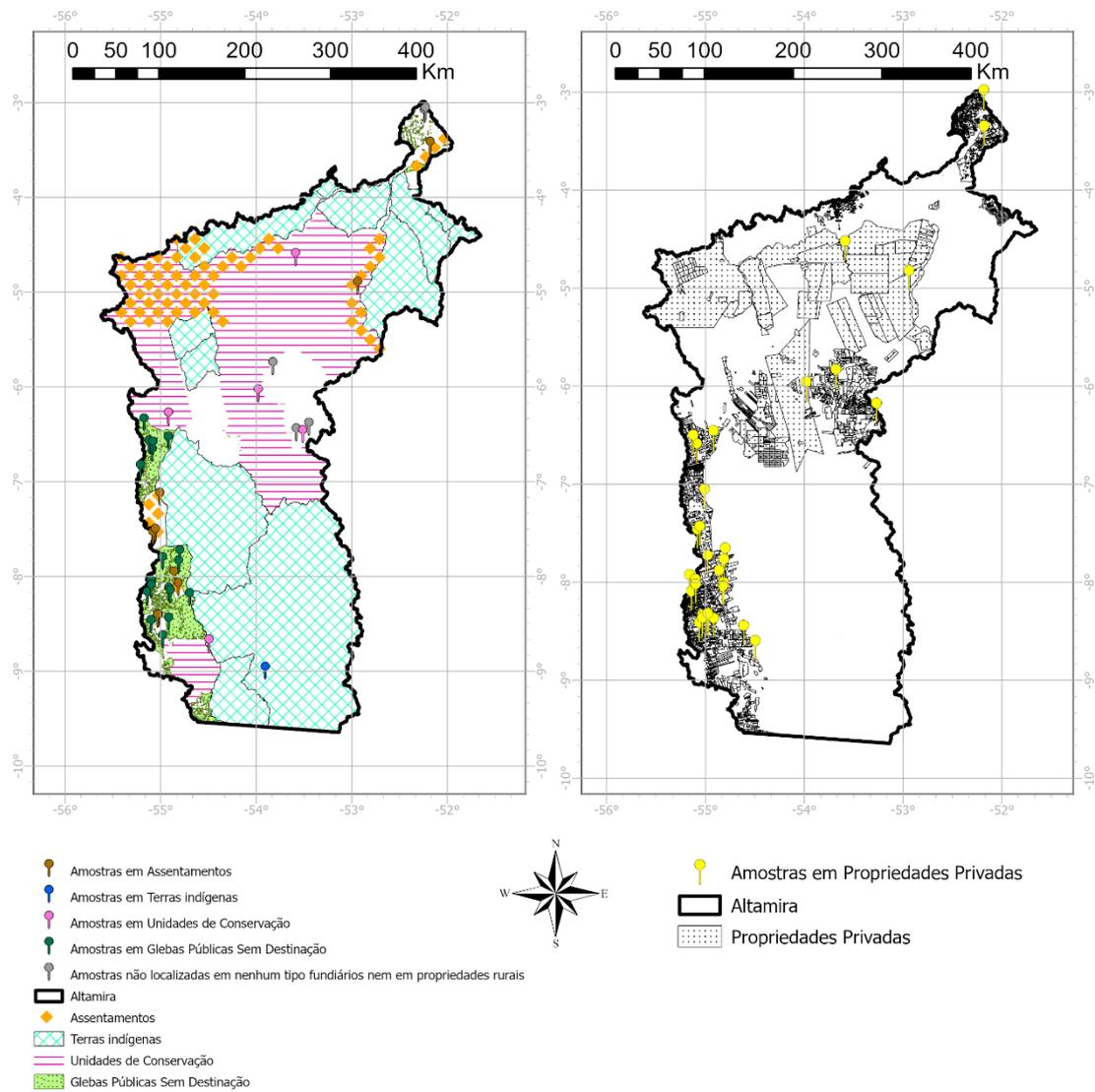


Figura 3.6. Amostras por tipo fundiário no município de Altamira, no estado do Pará.
Fonte: O Autor.

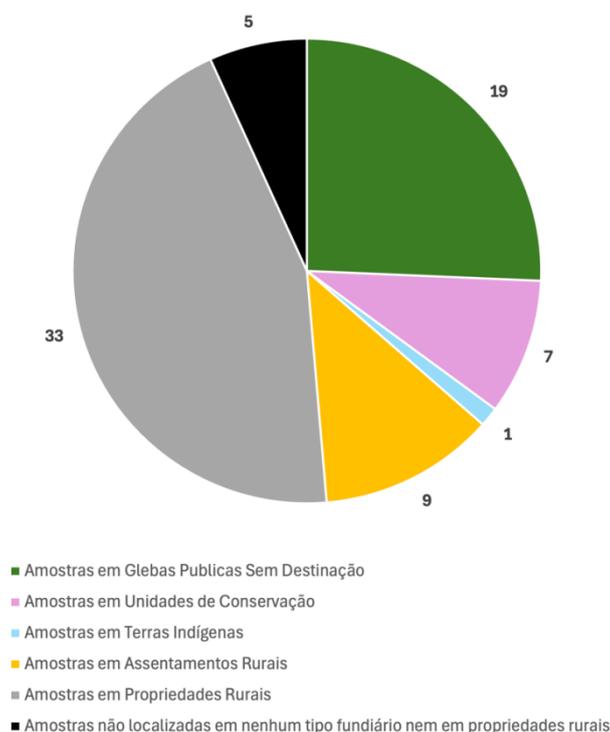


Figura 3.7. Distribuição das amostras por tipo fundiário. Fonte: O Autor.

Das 50 amostras, 33 estão localizadas em propriedades rurais. Porém, algumas propriedades rurais estão localizadas em territórios indígenas, unidades de conservação, assentamentos rurais e glebas públicas não destinadas. Das 33 propriedades rurais que contêm amostras, 14 estão localizadas nos tipos fundiários indicados acima, sendo 10 localizadas em propriedades rurais inseridas em glebas públicas sem destinação, cinco localizadas em propriedades rurais inseridas em unidades de conservação, e nove localizadas em propriedades rurais inseridas em assentamentos rurais (Tabela 3.4)

Tabela 3.4. Número de amostras localizadas em propriedades rurais, as quais também encontram se inseridas em outros tipos. Fonte: Elaborado pelo autor.

Discriminação	Quantidade
Amostras em propriedades rurais inseridas em glebas públicas sem destinação	10
Amostras em propriedades rurais inseridas em unidades de conservação	5
Amostras em propriedades rurais inseridas em assentamentos rurais	9

As séries temporais do SATVeg de cada amostra foram analisadas por meio do algoritmo LT-GEE. Mudanças bruscas nas curvas espectro-temporais de índice de vegetação correspondem a vértices de mudanças na vegetação, indicando desmatamento (Figura 3.6).

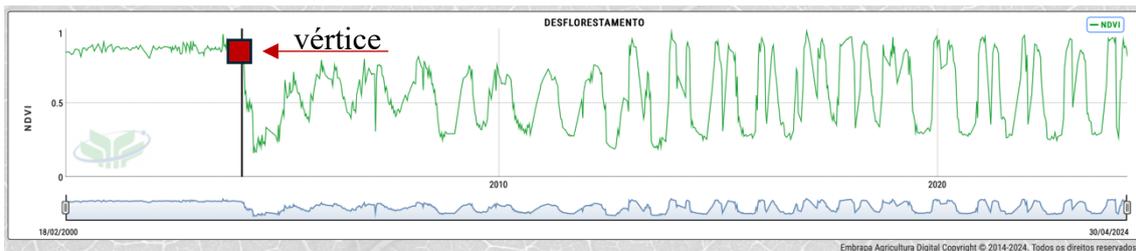


Figura 3.8. Vértice de mudança na curva espectro-temporal detectado pelo algoritmo *UI Application LandTrendr Pixel Time Series Plotter*, indicando possível desmatamento. Fonte: O Autor.

Para dar subsídio à análise do SATVeg, foram extraídos dados da dinâmica temporal de uso e cobertura da terra dos dados do MapBiomas. Foi utilizado o *software* QGIS versão 3.36.2 e os mapas de uso e cobertura de terras de 2003 a 2021 do sítio eletrônico <https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>, nos quais foram adicionados os arquivos vetoriais (*shapefiles*) das 50 amostras separadamente e analisados ano a ano. Foi utilizada a ferramenta *Zonal Histogram* para calcular o número de pixels de cada amostra de acordo com os códigos da legenda para os valores de pixel na coleção 8 do MapBiomas (MAPBIOMAS, 2023). De acordo com a documentação do QGIS, essa ferramenta anexa campos que representam contagens de cada valor único de uma camada rasterizada contida em zonas definidas como polígonos, modificando a tabela de atributos da camada, a qual terá tantos campos como os valores únicos da camada raster que intersecta o(s) polígono(s) (MAPBIOMAS, 2023).

Na sequência, os dados da tabela de atributos de cada amostra foram copiados para criar um gráfico da trajetória temporal com as classes de uso do solo de acordo com os códigos da legenda da coleção 8 do MapBiomas. Os gráficos foram gerados empregando-se a planilha eletrônica Microsoft Excel. Em seguida, foram comparados visualmente, tendo como base os eixos X e Y, os gráficos da trajetória temporal dos dados do MapBiomas com os gráficos do SATVeg e do algoritmo *UI Application LandTrendr Pixel Time Series Plotter*.

Devido ao pouco tempo e recursos financeiros, não foi possível realizar experimentos em campo nem coletar dados de campo. A premissa foi a de que, para que a comparação entre os gráficos fosse similar, os vértices do LandTrendr deveriam estar visualmente aproximados ou coincidentes com os vértices detectados no SatVeg. Se não houvesse correlação entre os vértices dos dois gráficos, a comparação entre os gráficos não seria possível, caso em estabelecemos a comparação como diferente ou com resultados negativos.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Resultados

Os resultados das análises foram agrupados segundo os padrões de comportamento do NDVI das amostras. Primeiramente, a latitude e a longitude das amostras cujos gráficos são mostrados nesse capítulo estão demonstrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Coordenadas geográficas das amostras cujos dados e gráficos são demonstrados neste capítulo.

Amostra	Latitude	Longitude
1	-7,931806	-54,978556
3	-9,088889	-53,906111
4	-5,876667	-53,826944
5	-6,406944	-54,918056
7	-3,215278	-52,239167
18	-7,665556	-55,081389
20	-8,299722	-55,141667

A Figura 4.1 mostra a localização da Amostra 1 e o padrão temporal de NDVI do pixel realizado por meio do SATVeg no período de 2000 a 2021. De 2000 até meados de 2009, o padrão espectral de NDVI indica uma área florestal (área tracejada azul), sendo que a transformação em pastagem provavelmente ocorreu no ano de 2009 continuando até 2021 (área tracejada vermelha) (Figura 4.1).

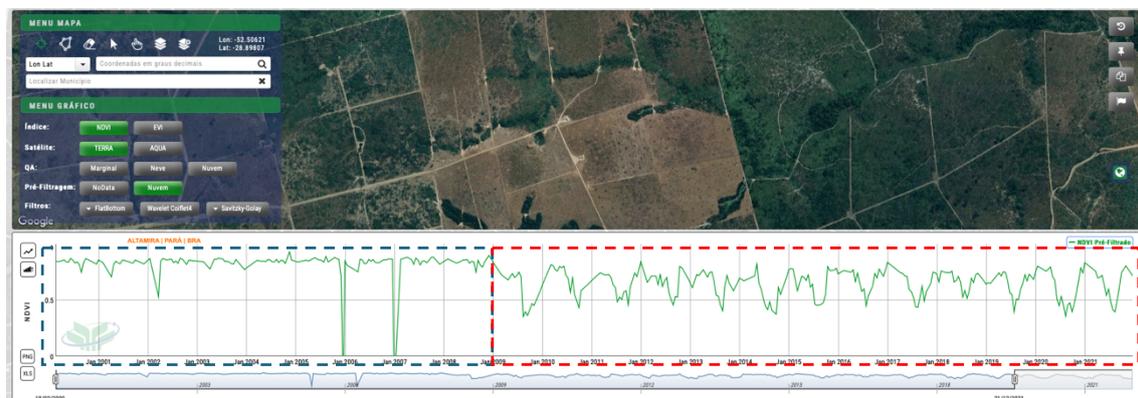


Figura 4.1. Padrão temporal do NDVI para a Amostra 1 na plataforma do SATVeg. A área tracejada azul indica formação florestal; a área tracejada vermelha aponta a transformação da floresta em pastagem. Fonte: O Autor.

Os dados da série temporal do uso e cobertura de terras do MapBiomias (Figura 4.2.) indica mudança no uso do solo entre 2008 e 2009, porém essa é uma análise para 5204 pixels, enquanto tanto o SATVeg quanto o LT-GEE são baseados em um único pixel. No entanto, optamos por realizar a comparação dos gráficos do SATVeg e do LT-GEE com a série temporal de toda a área embargada pelos dados do MapBiomias, primeiro para possibilitar uma ideia abrangente da mudança temporal da cobertura da área embargada, e segundo para possuirmos mais comparações para basearmos nossos resultados.

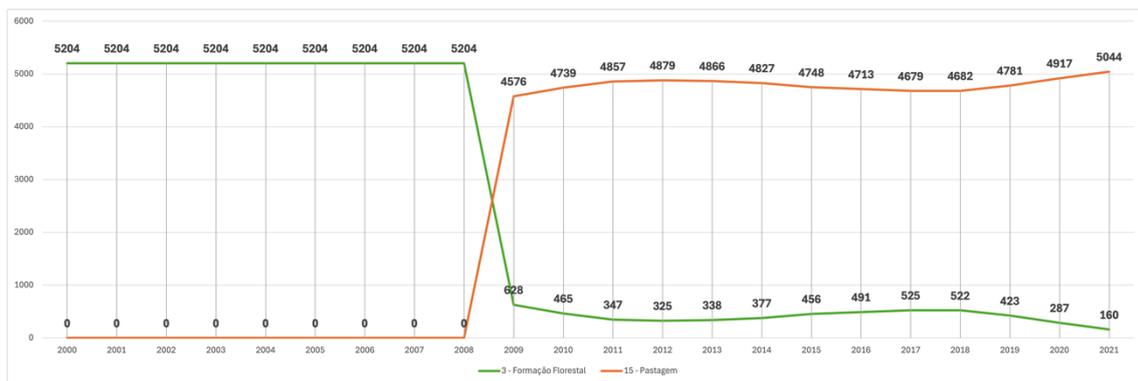


Figura 4.2. Série temporal do uso e cobertura da terra para do MapBiomias para a Amostra 1. Fonte: O Autor.

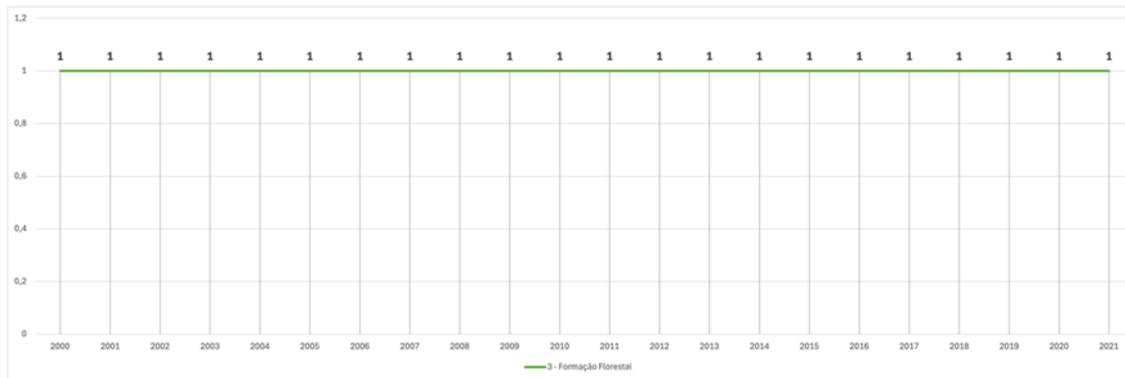
No entanto, os dados do LandTrendr demonstram que os segmentos de reta do algoritmo caem continuamente, mesmo que os valores de NDVI se mantivessem relativamente estáveis até 2009, e depois começassem a declinar mais vertiginosamente. Mesmo que o gráfico do LandTrendr indique perda da vegetação, a análise visual dos dados não bate com os dados do MapBiomias e com os do SatVEG (Figura 4.3).



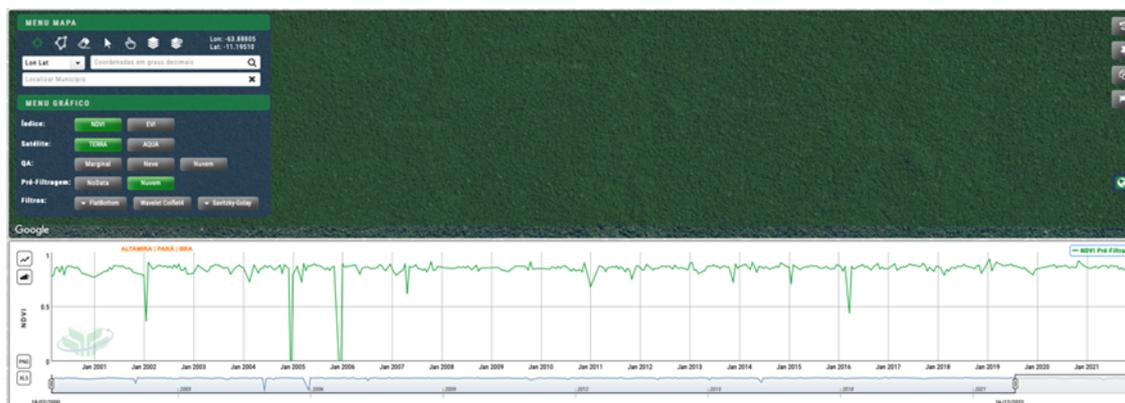
Figura 4.3. Padrão temporal do NDVI para a Amostra 1 obtido pelo algoritmo LT-GEE. Fonte: O Autor.

A análise do algoritmo seria melhor realizada em áreas embargadas com até 50 m², ou uma combinação da variação de todos os pixels da área embargada e o cálculo médio dos mesmos. Embora a análise da série temporal do MapBiomas e dos gráficos do SATVeg e do LT-GEE confirmem a perda da vegetação nativa para pastagem, as datas variam. O mesmo padrão ocorre nas amostras 2 e 31.

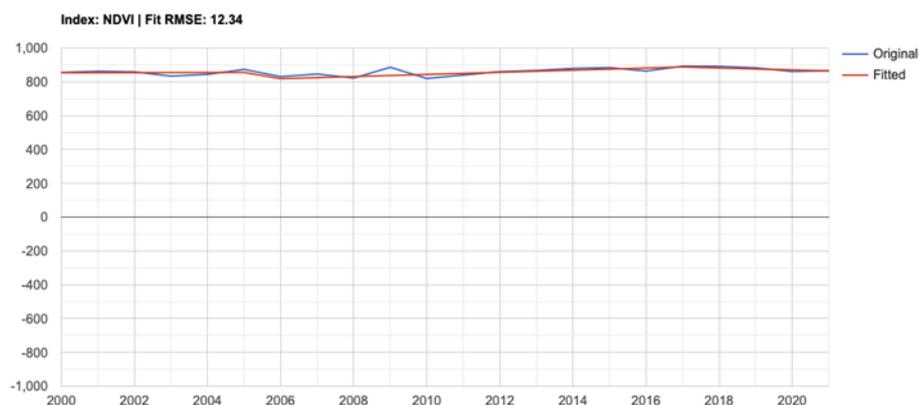
Já a Amostra 3 demonstra ser a de uma floresta, cujos índices de vegetação são predominantemente estáveis ao longo dos anos. Embora a trajetória espectral não demonstre uma degradação causada por atividade antrópica, os shapefile retirados do geoportal do Ibama indicam que houve sim um embargo ambiental nessas áreas. Além disso, as amostras foram escolhidas por sorteio aleatório, ou seja, não houve interferência dos autores na escolha das amostras. Por causa disso, optamos por manter a análise dessas amostras. Os resultados do LT-GEE para a amostra 3 indicam segmentos de retas contínuos e com altos valores de NDVI (Figura 4.4). Os mesmos padrões foram observados para as Amostras 9, 15, 28, 29, 30 e 38.



(A)



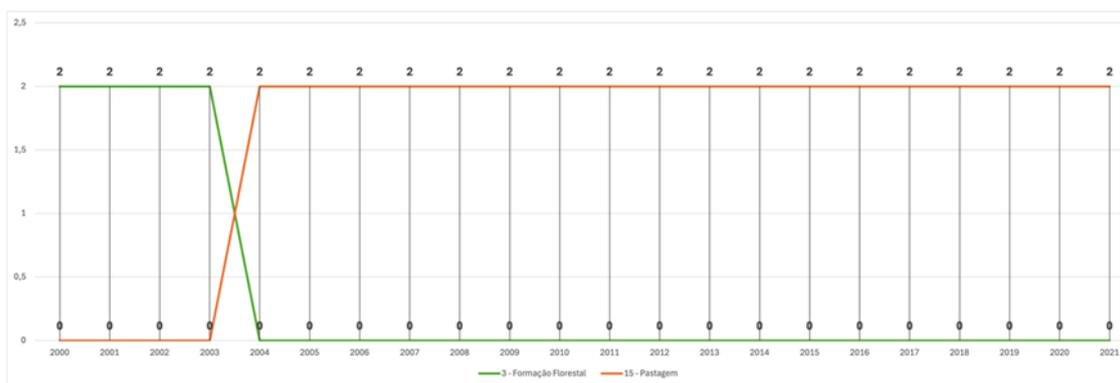
(B)



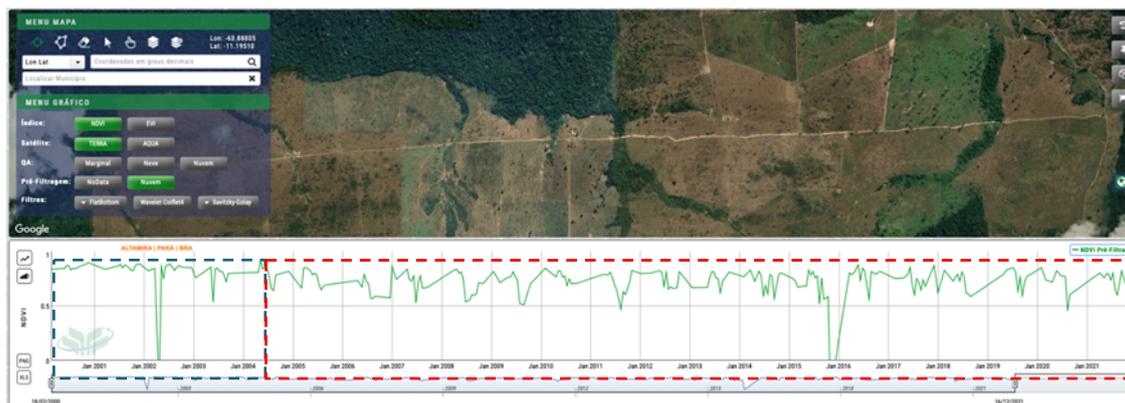
(C)

Figura 4.4. Padrões temporais de NDVI para Amostra 3 na plataforma SATVeg (A) e os correspondentes resultados produzidos pelo algoritmo LT-GEE (B) e pelos dados da série temporal do MapBiomias (C). Fonte: O Autor.

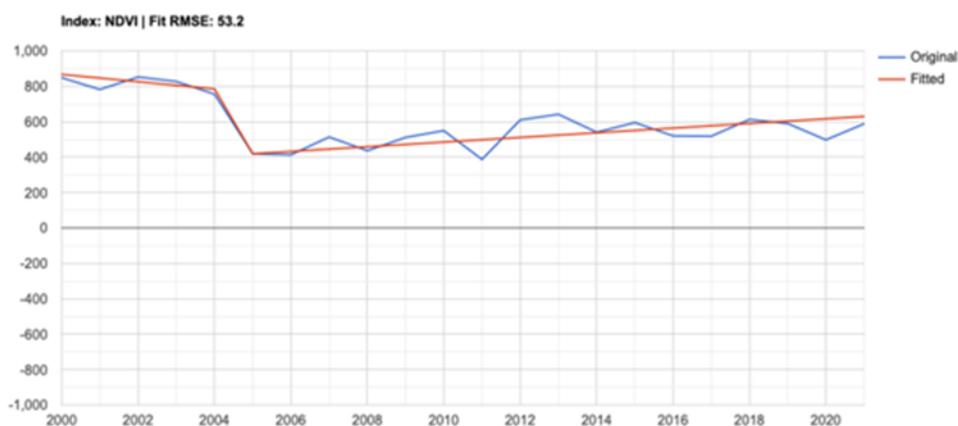
Para Amostra 4, os padrões temporais do SATVeg para NDVI indicam uma área florestal com relativa estabilidade (área azul), exceto para as datas de 23 de abril de 2002 e 25 de maio de 2003, sendo que nos anos subsequentes, os padrões demonstram ser típicos de uma pastagem. A série temporal com os dados do MapBiomias corrobora os dados do SATVeg. No gráfico do LT-GEE, ambos os índices de vegetação tiveram uma queda abrupta de 2004 para 2005, seguindo por um relativo aumento gradual da vegetação até 2021 (Figura 4.5).



(A)



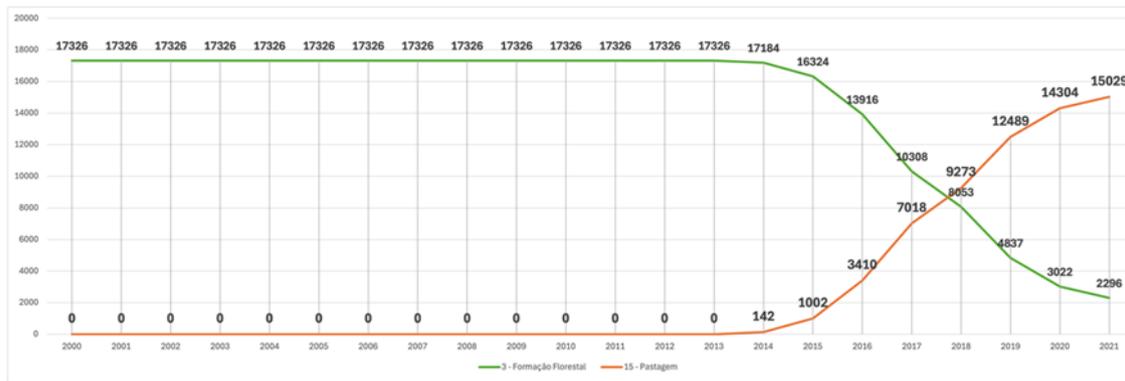
(B)



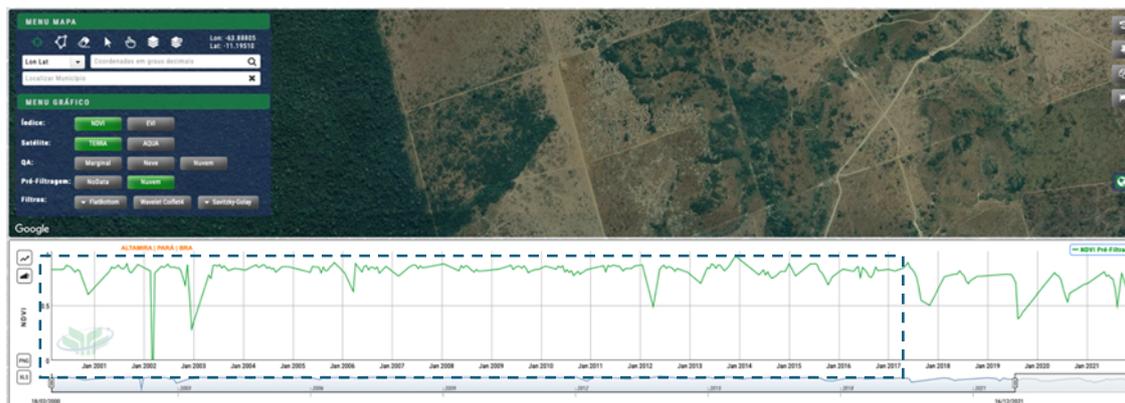
(C)

Figura 4.5. Padrões temporais de NDVI para Amostra 4 na plataforma SATVeg (A) e os correspondentes resultados produzidos pelo algoritmo LT-GEE (B) e pelos dados da série temporal do MapBiomias (C). Fonte: O Autor.

Na Amostra 5, os padrões do SATVeg para NDVI indicam uma área florestal (área azul) até 2017, sendo, em seguida, provavelmente convertida para um cultivo anual de dois ciclos (Figura 4.6). No gráfico do LT-GEE, pode-se observar o declínio da vegetação a partir de 2015. Os mesmos padrões da Amostra 5 foram observados para as Amostras 6, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 19, 21, 22, 24, 26, 27, 33, 32, 34, 35, 36, 37, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 47, 48, 49 e 50.



(A)



(B)

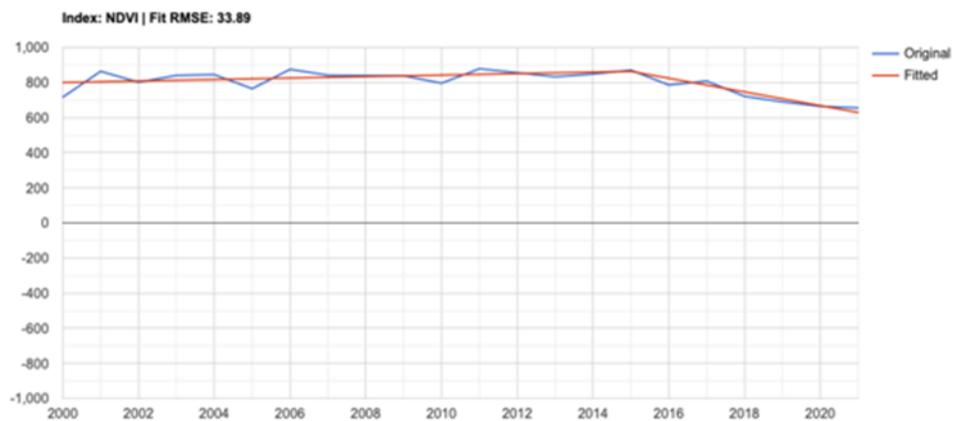
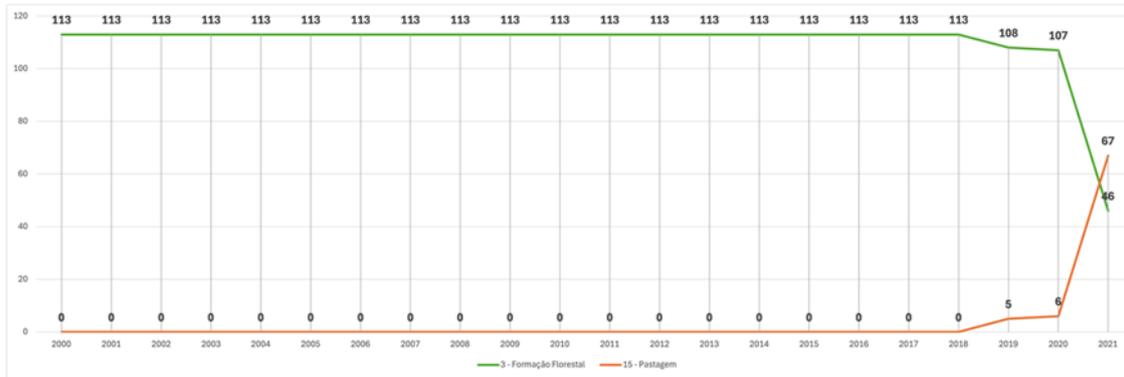


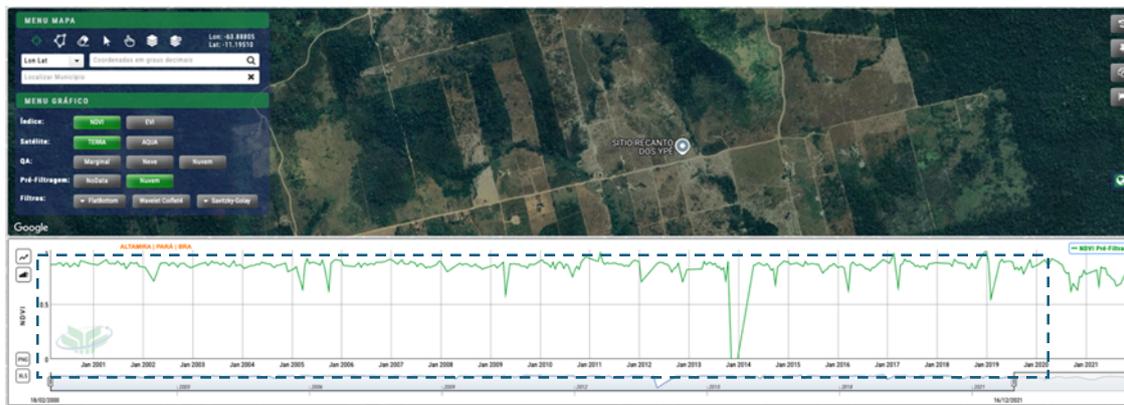
Figura 4.6. Padrões temporais de NDVI para Amostra 5 na plataforma SATVeg (A) e os correspondentes resultados produzidos pelo algoritmo LT-GEE (B) e pelos dados da série temporal do MapBiomias (C). Fonte: O Autor.

Para Amostra 18, o padrão de NDVI do SATVeg demonstrou uma queda do índice nos anos 2005 e 2013, mas apenas a partir de 2020 o padrão se diferenciou de uma floresta (Figura 4.7). Para a mesma amostra, o algoritmo do LT-GEE não reconheceu as variações dos anos 2005 e 2013 como vértices que indicam uma ruptura ou uma mudança longa.

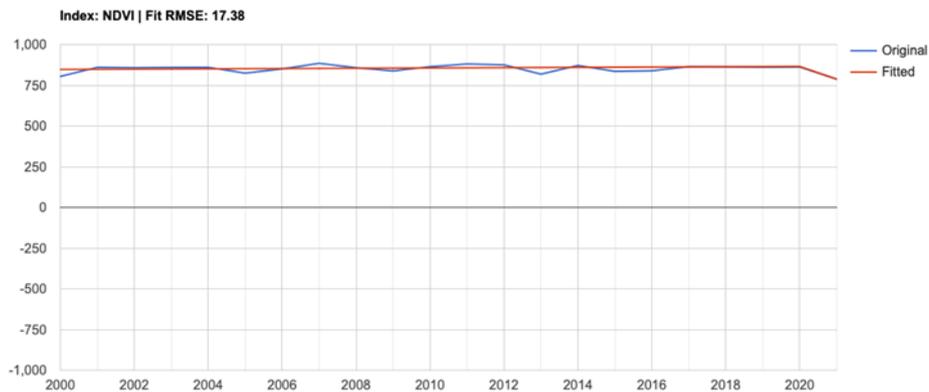
Por outro lado, o algoritmo percebe o ano de 2020 como um vértice que indica uma mudança de longo prazo.



(A)



(B)

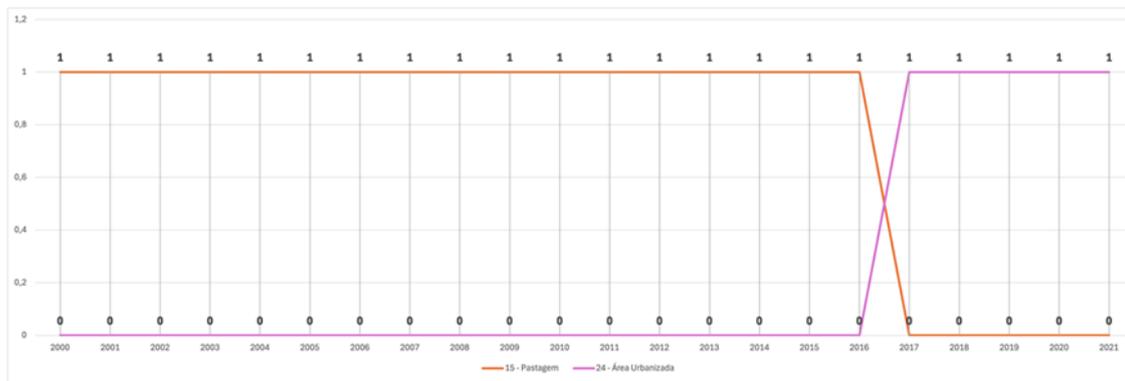


(C)

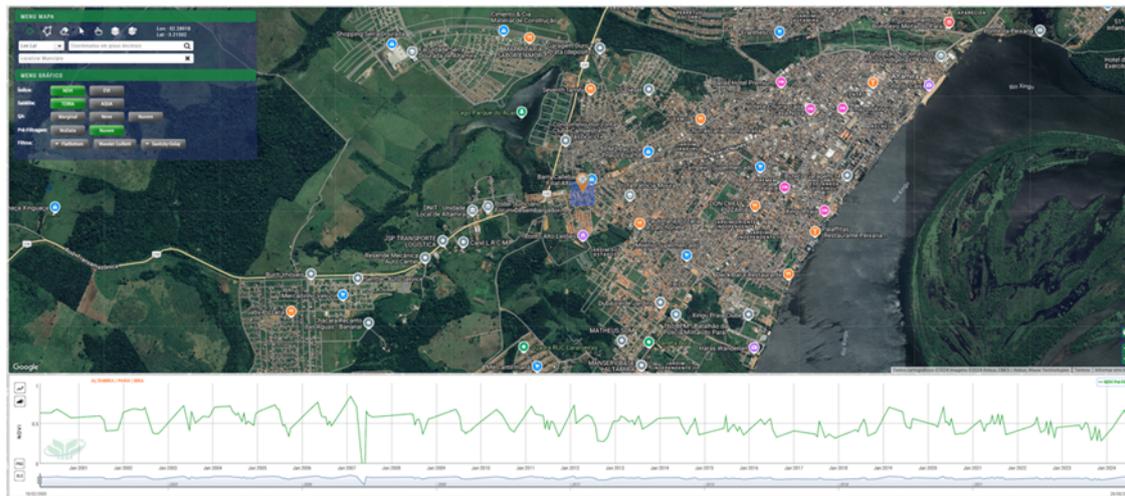
Figura 4.7. Padrões temporais de NDVI para Amostra 18 na plataforma SATVeg (A) e os correspondentes resultados produzidos pelo algoritmo LT-GEE (B) e pelos dados da série temporal do MapBiomias (C). Fonte: O Autor.

A Amostra 7 está localizada em perímetro urbano no município de Altamira, logo os padrões do SATVeg não são representativos de culturas agrícolas ou formações florestais. Os gráficos do LT-GEE indicam perda gradativa de vegetação, porém não é

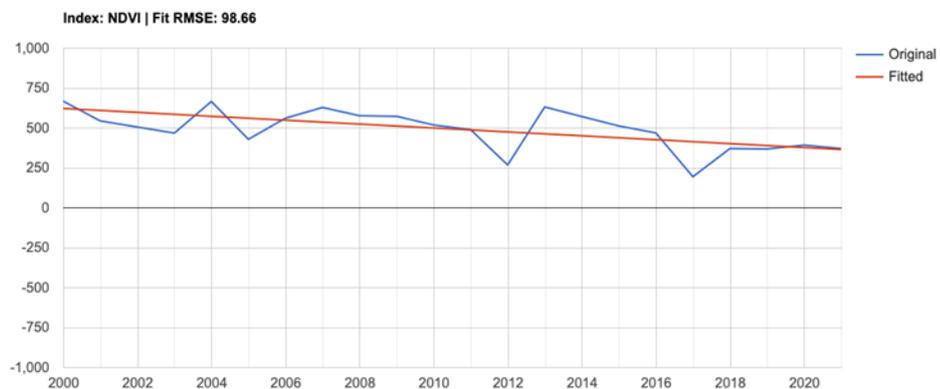
possível comparar as duas plataformas (Figura 4.8). A amostra 8 também está localizada em perímetro urbano, apresentando resultados semelhantes. As amostras foram escolhidas de forma aleatória, sem intervenção dos pesquisadores. Ao contrário das demais, que estão inseridas em áreas rurais, essas amostras estão contidas nas áreas urbanas. Assim, essas amostras são bons exemplos para demonstrar a eficácia do LT-GEE para analisar embargos ambientais realizados em cidades.



(A)



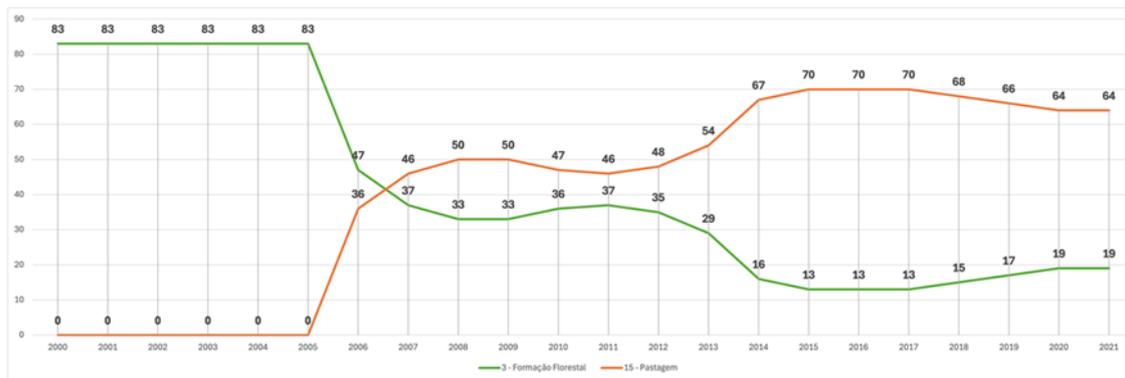
(B)



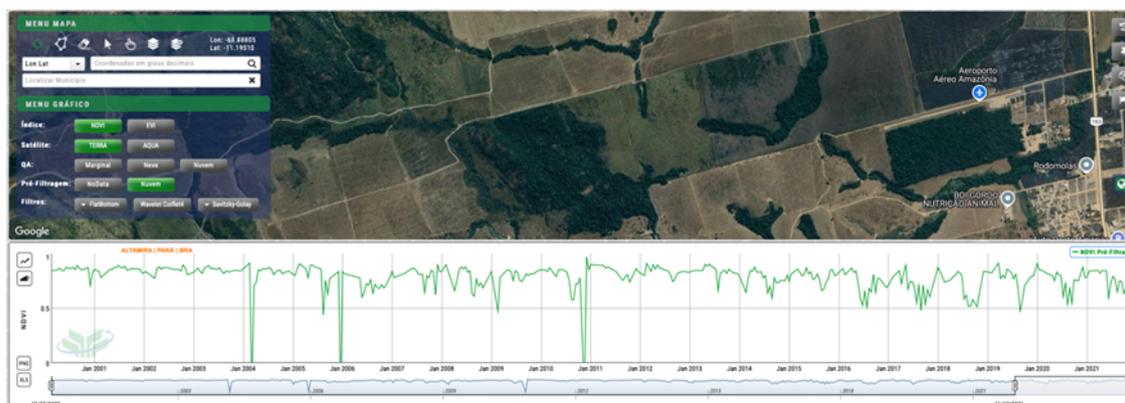
(C)

Figura 4.8. Padrões temporais de NDVI para Amostra 7 na plataforma SATVeg (A) e os correspondentes resultados produzidos pelo algoritmo LT-GEE (B) e pelos dados da série temporal do MapBiomias (C). Fonte: O Autor.

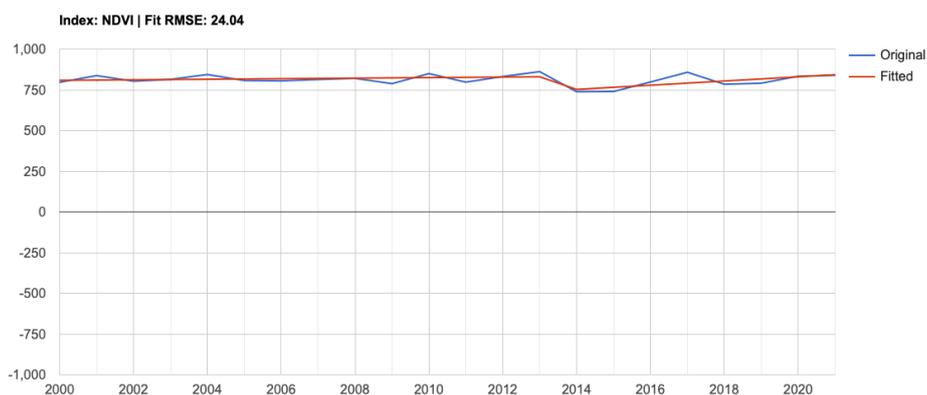
A Amostra 20 parece estar localizada em uma região com vegetação densa, área degradada e com uma estrada sem pavimentação. O gráfico de NDVI do SATVeg não demonstra apresentar um padrão definido de nenhum alvo que consta na biblioteca de padrões. Apesar dos dados do MapBiomias demonstrarem apenas duas classes de solo, vegetação e pastagem, os dados valem para toda a área embargada. Já os dados do SATVeg e do LT-GEE representam variações apenas naquele pixel em que se encontram a vegetação densa, área degradada e estrada não pavimentada. Os gráficos de NDVI do LT-GEE demonstram uma mudança de padrão de 2013 para 2014, aparentemente sem correspondência com os valores de NDVI do SATVeg (Figura 4.9). Dessa forma, essa amostra também demonstra que não há correspondência entre o SATVeg e o LT-GEE quando a superfície analisada possui construções como a estrada. O mesmo ocorreu para as Amostras 23, 25 e 46.



(A)



(B)



(C)

Figura 4.9. Padrões temporais de NDVI para Amostra 20 na plataforma SATVeg (A) e os correspondentes resultados produzidos pelo algoritmo LT-GEE (B) e pelos dados da série temporal do MapBiomas (C). Fonte: O Autor.

4.2. Discussão

Em nossa análise entre SATVeg e LT-GEE, as Amostras 1, 2 e 31 foram similares. Tanto no SATVeg quanto no LT-GEE, houve indicação de cobertura florestal nos primeiras anos da trajetória, seguido por um período de desmatamento e subsequente período de pastagem, com baixos valores de NDVI.

As Amostras 3, 9, 15, 28, 29, 30 e 38 demonstraram padrões relativamente contínuos de NDVI. A Amostra 4 mostrou uma área florestal com trajetória mais ou menos relativa, seguida por uma trajetória como pastagem, com baixos valores de NDVI. As Amostras 5, 6, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 19, 21, 22, 24, 26, 27, 33, 34, 35, 36, 37, 39, 41, 42, 43, 44, 45, 47, 48, 49 e 50 indicaram uma longa trajetória com cobertura vegetal, com valores altos de NDVI, seguido por um período de cultivo.

Na Amostra 18, os padrões do SATVeg se diferenciaram dos padrões do LT-GEE. As Amostras 7 e 8 são localizadas em áreas urbanas, e, pelos motivos explanados acima, não houve como comparar os gráficos do SATVeg com os do LT-GEE. As Amostras 20, 23, 25 e 46 estão localizadas em áreas que apresentaram, ao mesmo tempo, vegetação densa, área degradada e estrada sem pavimentação, e, da mesma forma, não puderam ser comparadas. Do total de 50 amostras selecionadas, 43 amostras tiveram resultados semelhantes, e apenas sete tiveram resultados diferentes (Figura 4.20).

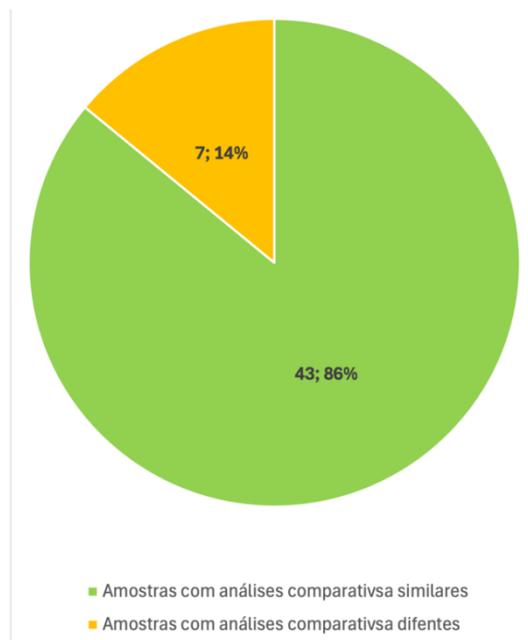


Figura 4.10. Resultado da análise comparativa entre os dados do SATVeg e os dados do LT-GEE. Fonte: O Autor.

Em geral, nossa análise encontrou mais semelhanças do que diferenças quando os gráficos do SATVeg foram comparados com os gráficos do LT-GEE. A maioria dos gráficos do LT-GEE das amostras foi compatível com os dados e gráficos do SATVeg e do MapBiomas.

Entretanto, a comparação somente foi possível quando a área embargada estava localizada fora de área urbana, ou não havia estrada de chão no pixel. Nesses casos, a comparação não foi possível. Devido ao fato do SATVeg ser bastante aceito pela literatura especializada como uma forma análise espectro-temporal do uso e mudança do solo, e de nossos resultados resultarem um número mais significativo de comparações similares (43 Amostras ou 86 por cento) do que diferentes (7 Amostras ou 14 por cento), concluímos que o *UI LandTrendr Pixel Time Series Plotter* é sim uma ferramenta eficaz para indicar a regeneração de áreas degradadas na Floresta Amazônica. No capítulo seguinte, realizamos um estudo de caso a fim de demonstrar as possibilidades para o monitoramento ambiental da Floresta Amazônica com o uso do *UI LandTrendr Pixel Time Series Plotter*.

CAPÍTULO 5

UTILIZAÇÃO DO LT-GEE EM POLÍTICAS PÚBLICAS

5.1. Introdução

Em 2004, após anos de altos índices de desmatamento da floresta amazônica, o governo federal do Brasil decidiu criar um plano de trabalho para combater o desmatamento na região amazônica. Nesse ano, foi criado o Grupo Permanente de Trabalho Interministerial sobre o Desmatamento da Amazônia. A partir desse grupo, foi lançado o Plano de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm) cujo objetivo é promover a redução das taxas de desmatamento na Amazônia brasileira, por meio de um conjunto de ações integradas de ordenamento territorial e fundiário, monitoramento e controle, fomento a atividades produtivas sustentáveis e infraestrutura, envolvendo parcerias entre órgãos federais, governos estaduais, prefeituras, entidades da sociedade civil e setor privado (BIZZO; DE FARIAS, 2017).

A primeira fase do PPCDAm (2004-2008) priorizava quatro eixos temáticos: (1) planejamento da política de utilização de terras, expansão de áreas protegidas e homologação de terras indígenas; (2) controle e monitoramento, com auxílio de satélites para detecção de desmatamento, licenciamento ambiental e fortalecimento da aplicação das leis ambientais; (3) promoção de atividades sustentáveis no uso da terra, fazendo uso de crédito financeiro para produtores rurais, pesquisa científicas; e (4) desenvolvimento de infraestrutura sustentável, com foco nos setores de energia e transporte (WEST; FEARNSSIDE, 2021).

A segunda fase (2009-2011) incorporou as seguintes diretrizes: (1) valorização da floresta para conservação da biodiversidade, manejo florestal e prestação de serviços ambientais; (2) incentivos para melhor uso de áreas já desmatadas com inovação tecnológica e sistemas sustentáveis de produção; (3) apoio a certificações e valorização de produtos da biodiversidade e oriundos de atividades locais; (4) modelos alternativos de reforma agrária e consolidação de mais unidades de conservação e terras indígenas; (5) gestão descentralizada e compartilhada de políticas públicas; (6) estímulo à participação de diversos setores da sociedade amazônica; (7) incentivo à implementação do Cadastro Ambiental Rural (CAR) e regularização ambiental do imóvel rural; e (8) dar publicidade às ações realizadas pelo PPCDAm (MELLO; ARTAXO, 2017).

Na terceira fase (2012-2015), o Plano concentrou-se em três principais eixos temáticos: (1) Eixo Ordenamento Fundiário e Territorial, com promoção do ordenamento fundiário de terras públicas, visando a conservação da floresta; (2) Eixo Monitoramento e Controle, visando tornar mais célere o licenciamento os planos de manejo florestal e concessões florestais, aumentar eficiência da fiscalização e controle do desmatamento, aumentar a presença do Estado na Amazônia Legal, reduzir a impunidade administrativa e criminal relacionada ao desmatamento ilegal e promover a responsabilização ambiental das cadeias produtivas relacionadas ao desmatamento ilegal; (3) Eixo Fomento às Atividades Produtivas Sustentáveis, com a finalidade de promover a viabilidade das cadeias produtivas alternativas ao desmatamento, fomentar boas práticas agropecuárias, incentivar o Manejo Florestal Sustentável e promover adequação ambiental e fomentar atividades produtivas sustentáveis nos assentamentos da reforma agrária e na agricultura familiar (MMA, 2013).

Na quarta fase (2016 a 2020), foi adicionado um novo eixo temático. Além dos antigos eixos Ordenamento Fundiário e Territorial, Monitoramento e Controle, e Fomento às Atividades Produtivas Sustentáveis, o Plano desenvolveu o eixo Instrumentos Normativos e Econômicos, o qual visava a elaboração de normas e de instrumentos econômicos, fiscais e tributários que contribuiriam para o combate ao desmatamento, e a agregação de iniciativas relacionadas aos demais eixos (MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA, 2018). Em 2019, a política ambiental tomou novos rumos com a eleição do governo do presidente Jair Bolsonaro e com a extinção da Secretaria para Mudança Climática e Florestas e do Departamento de Floresta e Combate ao Desmatamento, órgão responsável pela implementação do PPCDAm (FONSECA; LINDOSO; BURSZTYN, 2022).

Em seu lugar, o governo federal implantou o Plano Nacional para Controle do Desmatamento Ilegal e Recuperação da Vegetação Nativa (2020-2023), que estabelecia cinco eixos temáticos: (1) Tolerância Zero ao Desmatamento Ilegal; (2) Regularização Fundiária; (3) Ordenamento Territorial; (4) Pagamento por Serviços Ambientais; e (5) Bioeconomia (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA CLIMÁTICA, 2020).

Em 2023, o PPCDAm foi novamente retomado (MMA, 2023b), sendo que nessa quinta fase do Plano, há a diferenciação de porcentagem do desmatamento na Amazônia Legal em áreas com e sem o Cadastro Ambiental Rural (CAR) sobrepostas com outras seis categorias fundiárias: área quilombola; terra indígena; unidade de conservação;

assentamento rural; terra pública não destinada; e áreas privadas ou sem informação (MMA, 2023b).

Um dos indicativos para averiguação dos resultados das metas estabelecidas por esse eixo é o número de embargos ambientais, os quais podem ser conceituados como a impedição, em caráter temporário ou definitivo, de uma obra que careça de licenças ou autorizações legais necessárias, ou que exceda os limites dos atos administrativos, ou que configure potencial ou efetivo risco de dano à saúde ou ao meio ambiente (MILARÉ, 2015b). A nível federal, o órgão executor das políticas públicas ambientais e responsável pela fiscalização ambiental na Amazônia Legal, incluindo a execução dos embargos ambientais, é o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama), o qual tem papel relevante na execução do PPCDAm.

A justificativa para esse estudo de caso é criar um modelo em que é possível identificar, por meio do *UI Application LandTrendr Pixel Time Series Plotter*, a ocorrência ou não de regeneração em áreas embargadas pelo Ibama, dentro do contexto de políticas públicas como o PPCDAm. O objetivo do estudo de caso é analisar a eficácia do para o monitoramento das áreas embargadas pelo Ibama no município de Altamira, no estado do Pará, e assim analisar se *Landsat-based detection of Trends in Disturbance and Recovery – LandTrendr* por meio da ferramenta *UI Application LandTrendr Pixel Time Series Plotter* pode contribuir para a eficácia do PPCDAm e de outras políticas públicas para combater a degradação da floresta amazônica. Para tal, separamos por sorteio cem áreas embargadas e as analisamos com a ferramenta online gratuita LandTrendr para o Google Earth Engine (LT-GEE) criada pela Universidade de Oregon (UNIVERSIDADE DE OREGON, 2023).

A escolha do município de Altamira se deu por conta de sua trajetória temporal com alto índice de desmatamento, e porque o município é objeto de estudos de diversos artigos científicos, fazendo dele um estudo de caso valioso na pesquisa científica sobre o desmatamento da floresta amazônica. Com essa pesquisa, esperamos avaliar se a ferramenta LT-GEE é eficaz para auxiliar no monitoramento ambiental das áreas embargadas que são objeto de controle do PPCDAm.

5.2. Materiais e Métodos

5.2.1. Materiais

Foram selecionadas por sorteio aleatório cem áreas embargadas distribuídas pelo município de Altamira (Figura 5.1), diferente daquelas amostras analisadas em comparação com o SATVeg.

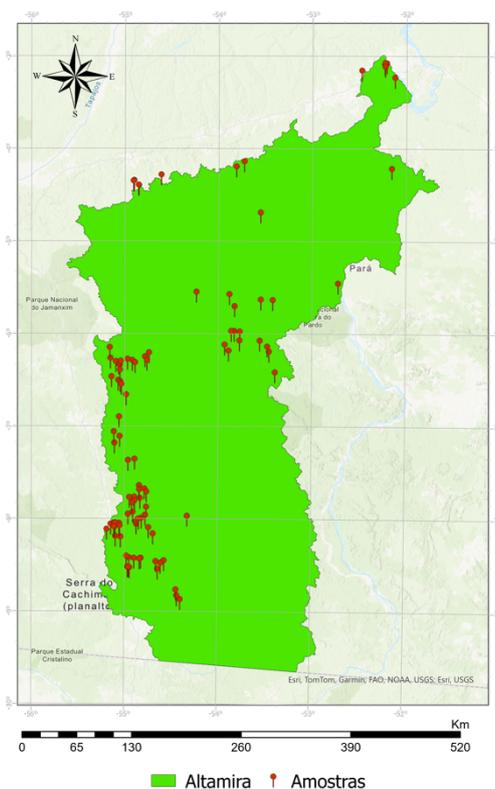


Figura 5.1. Localização das áreas embargadas pelo Ibama para amostra.

O município de Altamira possui cinco das seis classes fundiárias distintas na quinta fase do PPCDAm: Assentamentos Rurais; Territórios Indígenas; Unidades de Conservação; e Terras Públicas Não Destinadas. Os imóveis rurais do município distribuídos dentro dessas classes e em fora desses territórios (Figura 5.2).

As amostras estão distribuídas nas classes fundiárias pertencentes ao município de Altamira, conforme Figura 5.3. O PPCDAm, em sua quinta fase, além de discriminar o desmatamento nas seis classes fundiárias, identifica o corte ilegal dentro dos imóveis rurais sobrepostos às cinco outras classes (PPCDAM, 2023). No entanto, nessa pesquisa não vamos realizar essa diferenciação.

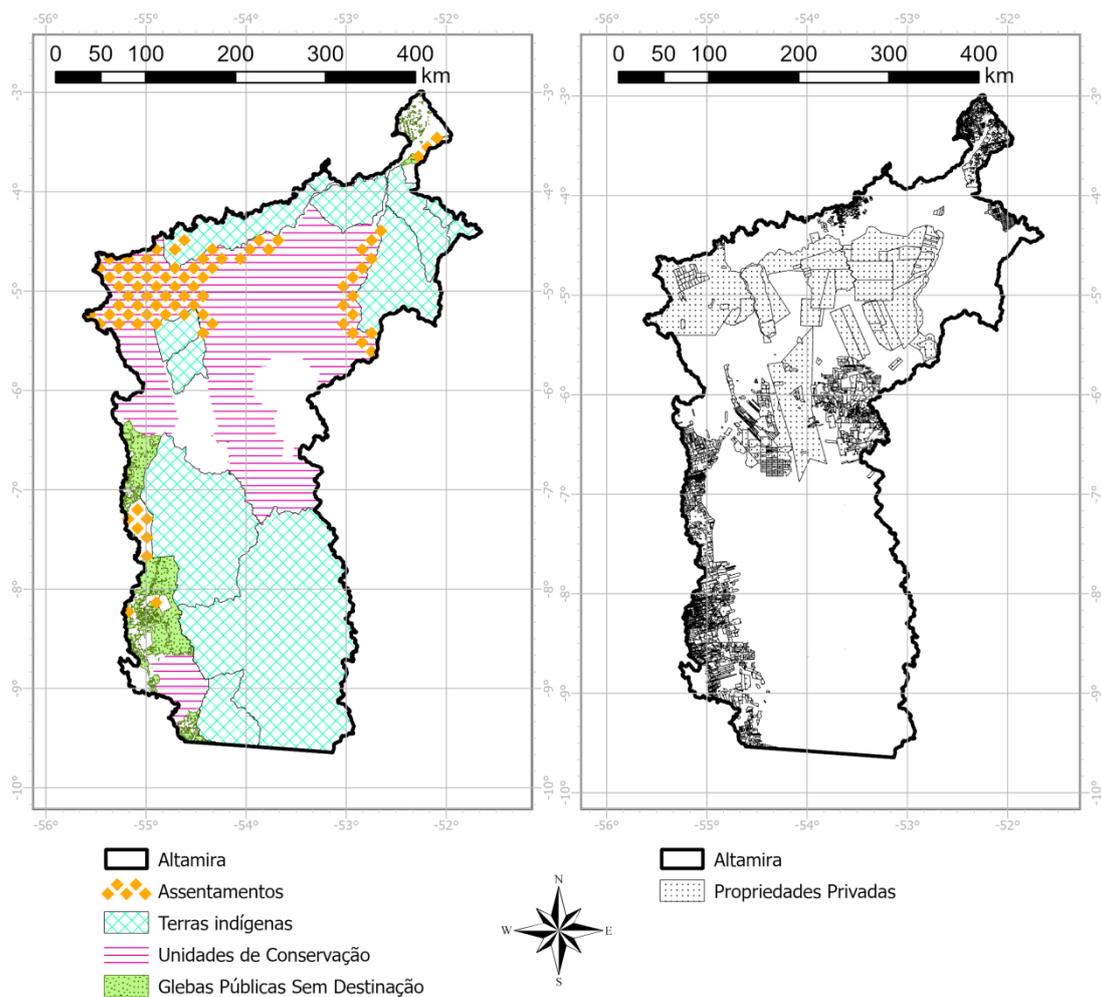


Figura 5.2. Distribuição das cinco classes fundiárias no município de Altamira, PA. O município não possui terras quilombolas, motivo pelo qual essa classe não será analisada na pesquisa. Fonte: O Autor.



Figura 5.3. Quantidade de amostras por tipo fundiário em Altamira, PA. O município não possui terras quilombolas, motivo pelo qual essa classe não será analisada na pesquisa. Fonte: O Autor.

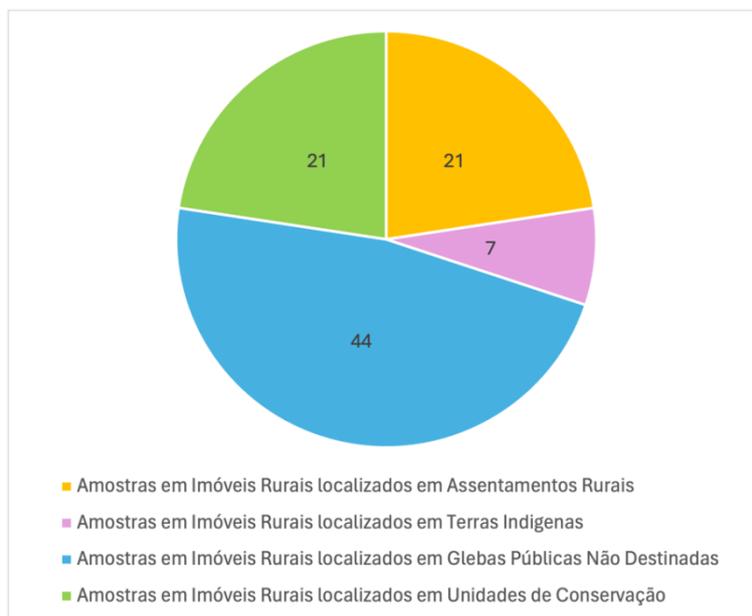


Figura 5.4. Quantidade de amostras em propriedades rurais sobrepostas com outras categorias fundiárias. Fonte: O Autor.

Em Altamira estão localizados 5.575 imóveis rurais. A área total, em km², das propriedades rurais e das outras classes fundiárias em Altamira está distribuída conforme a tabela 5.1.

Tabela 5.1. Área total (em km²) de classes fundiárias e propriedades privadas no município de Altamira, Pará. Fonte: O autor.

Dominialidade Territorial	Área (km²)
Terras indígenas	77.470,24
Unidades de conservação	56.171,65
Assentamentos	17.802,62
Terras públicas não destinadas	7.014,50
Propriedades privadas	66.904,28
Total	225.363,29

5.3. Procedimento Metodológico

Depois de separadas as amostras por categoria fundiária, analisou-se a trajetória temporal das áreas embargadas selecionadas por meio do *UI Application LandTrendr Pixel Time Series Plotter*, para o período de 2000 até 2022. Posteriormente foram analisadas, em cada classe fundiária, as áreas consideradas em regeneração, ou seja, aquelas amostras cujos gráficos do LT-GEE demonstram segmentos de retas do NDVI em ascensão; e as áreas consideradas degradadas, consideradas como aquelas cujos gráficos do LT-GEE indicam segmentos de retas do NDVI em queda.

5.4. Resultados

5.4.1. Terras Indígenas

Das sete amostras contidas em Territórios Indígenas, cinco (71%) tiveram perda de vegetação e duas (29%) tiveram regeneração (Figura 5.5).

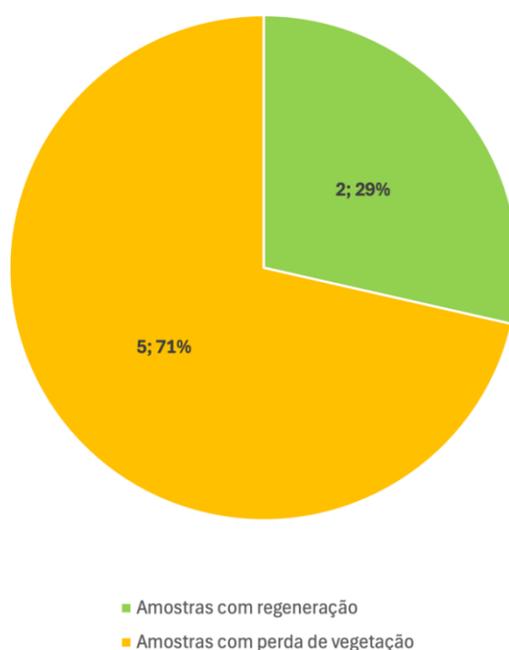


Figura 5.5. Quantidade de amostras em Terras Indígenas que tiveram perda de vegetação ou regeneração, e respectivas porcentagens. Fonte: O Autor.

A amostra 72 corresponde a uma área embargada pelo Ibama em 2017. De 2000 a 2015, a área apresentou grande perda de vegetação, conforme indicado pelos baixos índices de NDVI. No entanto, a partir de 2016, a área tem uma trajetória de regeneração. Por isso, consideramos com uma amostra com regeneração (Figura 5.6).

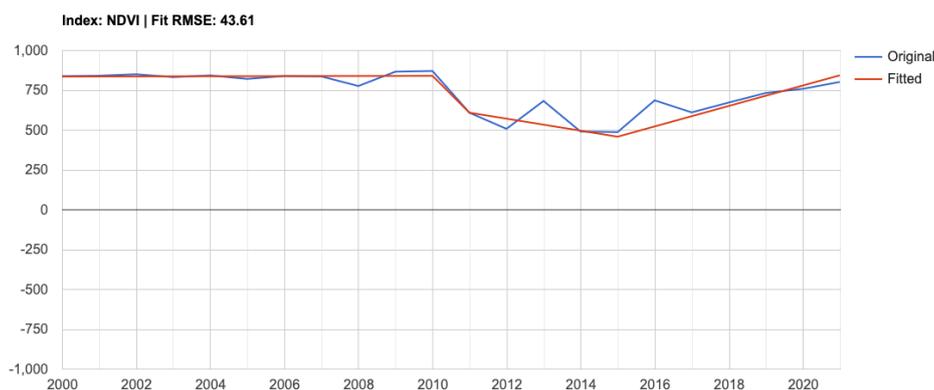


Figura 5.6. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 72 na plataforma do LT-GEE. Fonte: O Autor.

5.4.2. Unidades de Conservação

Das 21 amostras que se encontram dentro de Unidades de Conservação, 10 apresentaram perda de vegetação, 9 tiveram regeneração em seus territórios, e 2 se mantiveram constantes (Figura 5.7).

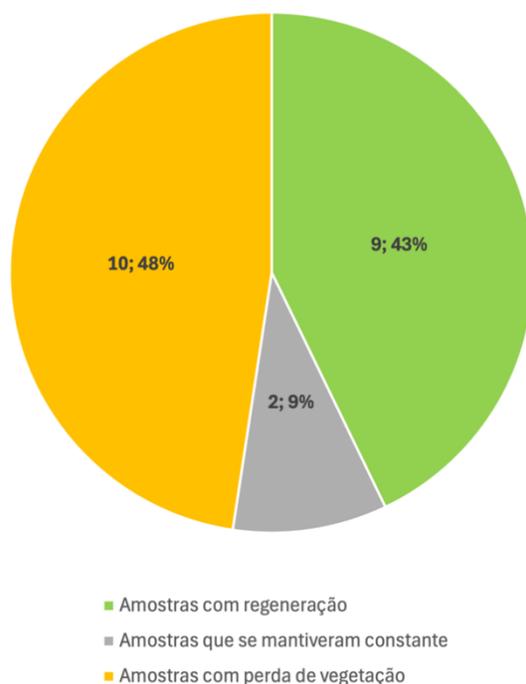


Figura 5.7. Quantidade de amostras em Unidades de Conservação que tiveram perda de vegetação ou regeneração, e respectivas porcentagens. Fonte: O Autor.

O LT-GEE indicou que para as amostras 9 e 36, a trajetória espectro temporal do NDVI manteve-se constante em todo o período. A curva do NDVI original da amostra 9

alterna entre pontos altos e baixos, porém o algoritmo LandTrendr trouxe segmentos retos em toda a trajetória (Figura 5.8). O mesmo ocorre com a amostra 36, mas com menos alternância em sua trajetória (Figura 5.9). Dessa forma, depreende-se essas duas amostras como constantes, sem considerável perda ou regeneração de sua vegetação.

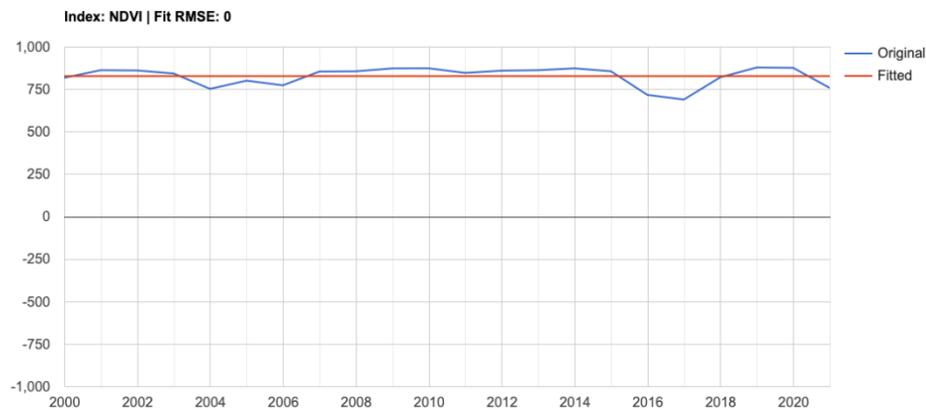


Figura 5.8. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 9 na plataforma do LT-GEE. Fonte: O Autor.

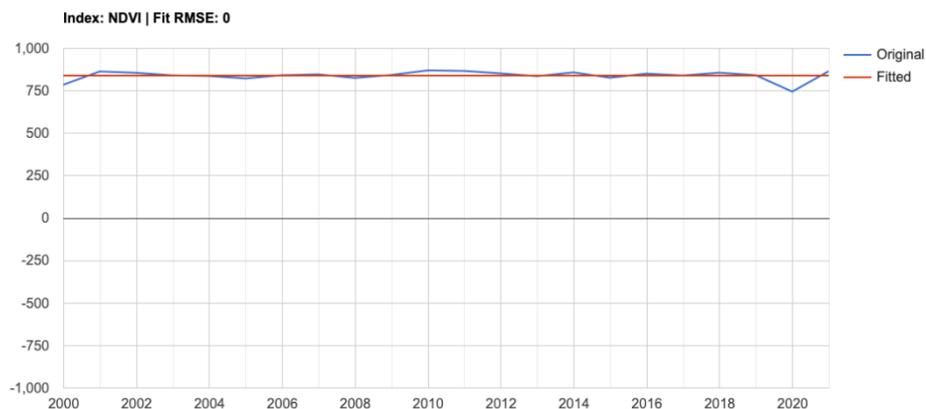


Figura 5.9. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 36 na plataforma do LT-GEE. Fonte: O Autor.

5.4.3. Assentamentos

Foram analisadas 21 amostras dentro de Assentamentos Rurais. Dessas, 14 (67%) apresentaram perda de vegetação; 5 (24%) possuem trajetórias com regeneração; e 2 (9%) se mantiveram constantes (Figura 5.10).

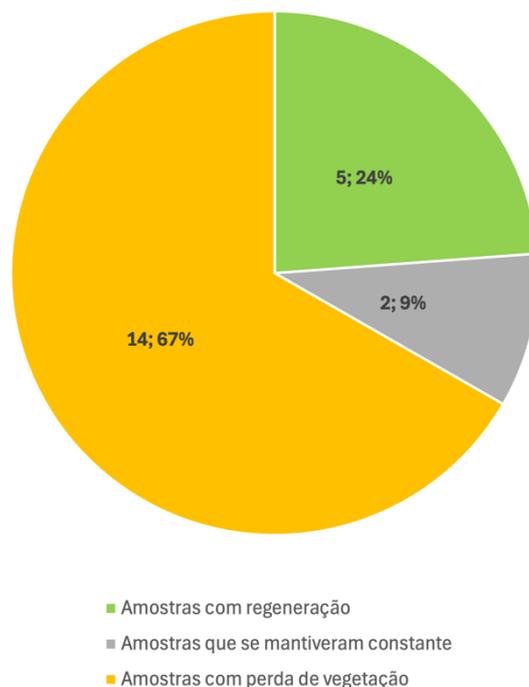


Figura 5.10. Quantidade de amostras em Assentamentos Rurais que tiveram perda de vegetação ou regeneração, e respectivas porcentagens. Fonte: O Autor.

A amostra 49 foi embargada pelo Ibama em 2015. De 2000 a 2004, ocorreu grande diminuição da vegetação na área embargada. Porém, a partir dessa data, há uma trajetória de regeneração (Figura 5.11). Similarmente, a amostra 57 foi embargada em 2008, mas apresentou uma trajetória de regeneração a partir de 2001 (Figura 5.12).

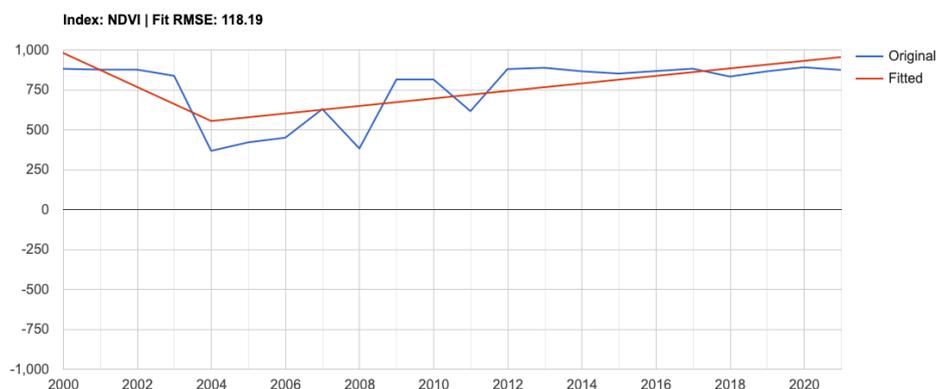


Figura 5.11. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 49 na plataforma do LT-GEE. Fonte: O Autor.

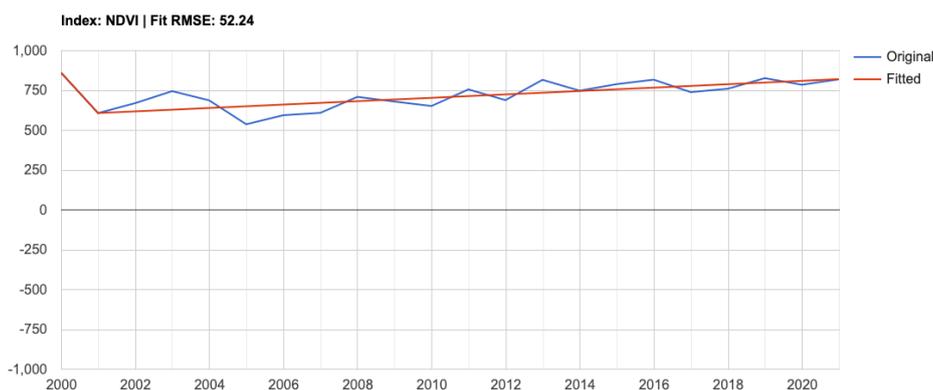


Figura 5.12. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 57 na plataforma do LT-GEE. Fonte: O Autor.

A amostra 54, embargada em 2014, apresentou de 2013 para 2014, perda de vegetação muito grande. De 2014 em diante, ocorre uma trajetória de regeneração. No entanto, essa trajetória não atinge o período anterior a perda. Assim, a amostra foi considerada com perda de vegetação (Figura 5.13).

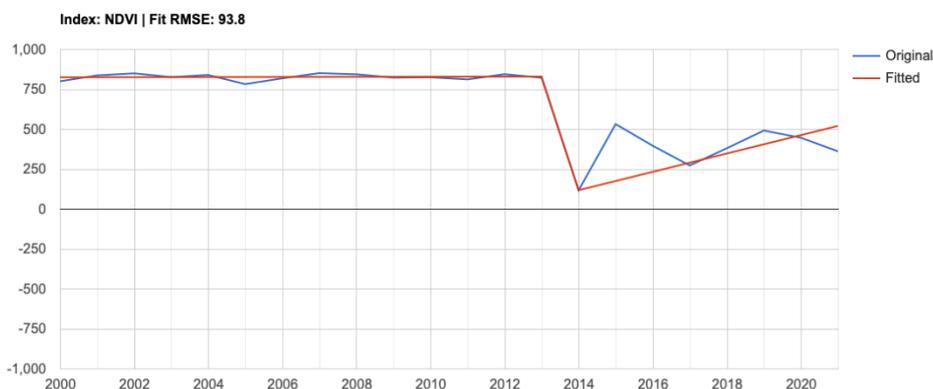


Figura 5.13. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 54 na plataforma do LT-GEE. Fonte: O Autor.

Dois amostras mantiveram constantes seus segmentos de reta gerados pelo LandTrendr. Nas amostras 9 e 36, as curvas de NDVI oscilam, porém o algoritmo LandTrendr demonstrou segmentos retos nas trajetórias (Figuras 5.14 e 5.15).

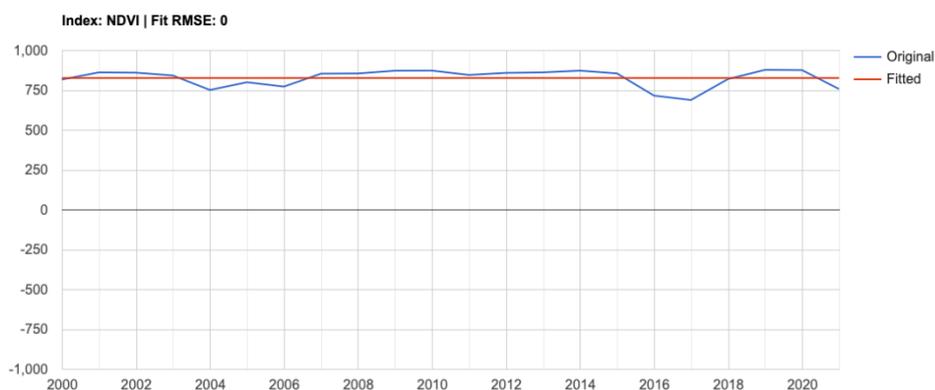


Figura 5.14. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 9 na plataforma do LT-GEE. Fonte: O Autor.

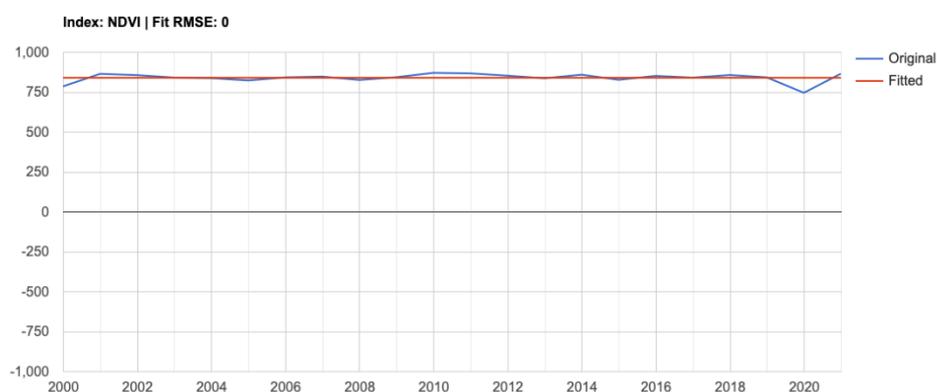


Figura 5.15. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 36 na plataforma do LT-GEE. Fonte: O Autor.

5.4.4. Glebas Públicas Não Destinadas

Foram analisadas 44 amostras de áreas embargadas em Glebas Públicas Não Destinadas. Dessas, 38 (86%) amostras tiveram perda de vegetação; e apenas 3 (7%) tiveram regeneração. Outras 3 (7%) amostras tiveram trajetórias constantes (Figura 5.16).

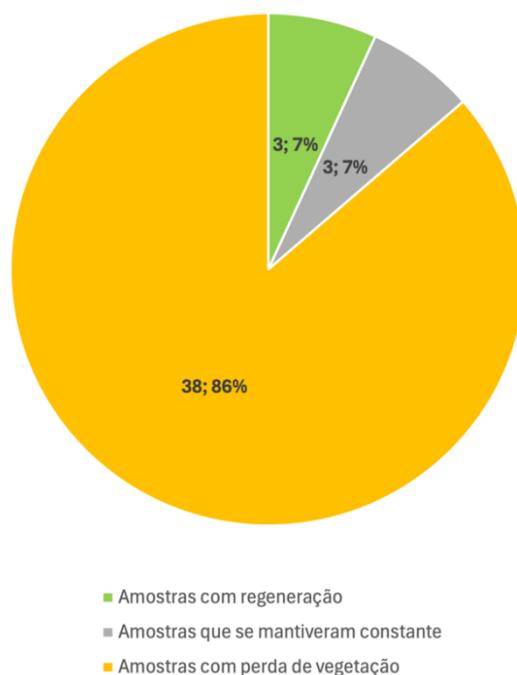


Figura 5.16. Quantidade de amostras em Terras Públicas Não Destinadas que tiveram perda de vegetação ou regeneração, e respectivas porcentagens. Fonte: O Autor.

A amostra 50 apresenta uma trajetória quase constante em todo o período. Porém, levando em conta os dados do período final comparado com o inicial, considerou-se como uma amostra com regeneração (Tabela 5.2 e Figura 5.17). O mesmo ocorre com a amostra 51 (Figura 5.18).

Tabela 5.2. Dados dos valores espectrais do NDVI (Original) e dados do melhor modelo de ajuste para os valores espectrais (Fitted) da amostra 50 (Max: 1,000.000. Min: -1,000.000). Elaborado pelo autor a partir dos dados do algoritmo LandTrendr no GEE.

Year	Original	Fitted
2.000	826,260	830,968
2.001	846,604	832,689
2.002	868,495	834,410
2.003	810,700	836,131
2.004	838,600	837,853
2.005	852,276	839,574
2.006	814,848	841,295
2.007	816,005	843,016
2.008	862,878	844,737
2.009	853,023	846,458
2.010	828,306	848,179
2.011	844,918	849,900
2.012	849,560	851,621
2.013	851,399	853,342
2.014	870,532	855,063
2.015	871,876	856,784
2.016	854,241	858,505
2.017	772,880	772,880

2.018	787,370	788,243
2.019	796,907	803,607
2.020	829,837	818,970
2.021	829,751	834,333

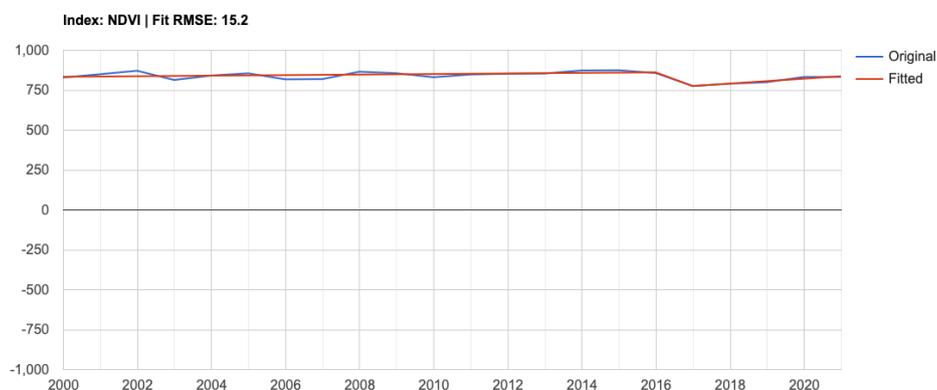


Figura 5.17. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 50 na plataforma do LT-GEE. Fonte: O Autor.

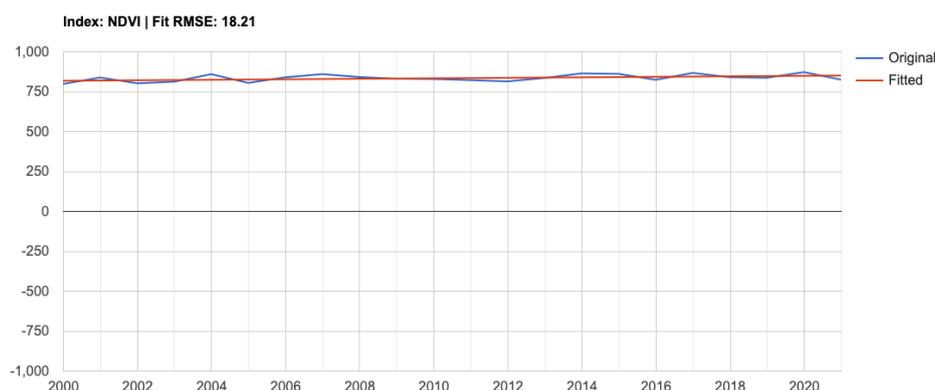


Figura 5.18. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 50 na plataforma do LT-GEE. Fonte: O Autor.

A amostra 69 possui trajetória quase constante, com pouca variação em seu NDVI. Porém, em 2000, o NDVI era de 856,586, e em 2021, 852,484. Já a trajetória realizada pelo LandTrendr, tem os valores de 838,887, e 856,389 para 2000 e 2021, respectivamente. Ou seja, enquanto os valores de NDVI demonstraram perda de vegetação, os valores do algoritmo do LandTrendr mostram regeneração. Entretanto, como a diferença entre esses valores não é tão grande como ocorre em outras amostras, considerou-se a amostra 69 com uma trajetória constante (Tabela 5.3 e Figura 5.19). O mesmo ocorre com a amostra 85 (Figura 5.20).

Tabela 5.3. Dados dos valores espectrais do NDVI (Original) e dados do melhor modelo de ajuste para os valores espectrais (Fitted) da amostra 69 (Max: 1,000.000. Min: -1,000.000). Elaborado pelo autor a partir dos dados do algoritmo LandTrendr no GEE.

Ano	Original	Ajustado
2.000	856,586	838,887
2.001	864,277	839,721
2.002	854,244	840,554
2.003	809,116	841,388
2.004	837,925	842,221
2.005	852,169	843,054
2.006	838,631	843,888
2.007	820,675	844,721
2.008	817,612	845,555
2.009	848,178	846,388
2.010	854,844	847,221
2.011	839,262	848,055
2.012	872,097	848,888
2.013	870,948	849,722
2.014	883,031	850,555
2.015	800,058	851,389
2.016	868,047	852,222
2.017	832,943	853,055
2.018	855,337	853,889
2.019	888,955	854,722
2.020	843,826	855,556
2.021	852,484	856,389

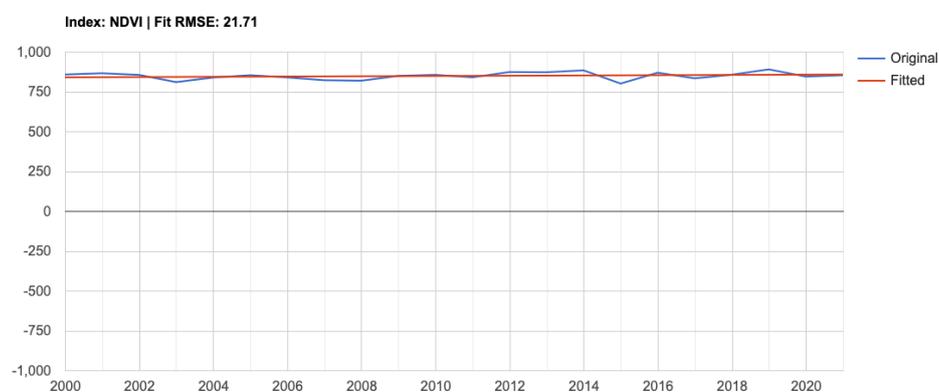


Figura 5.19. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 69 na plataforma do LT-GEE. Fonte: O Autor.

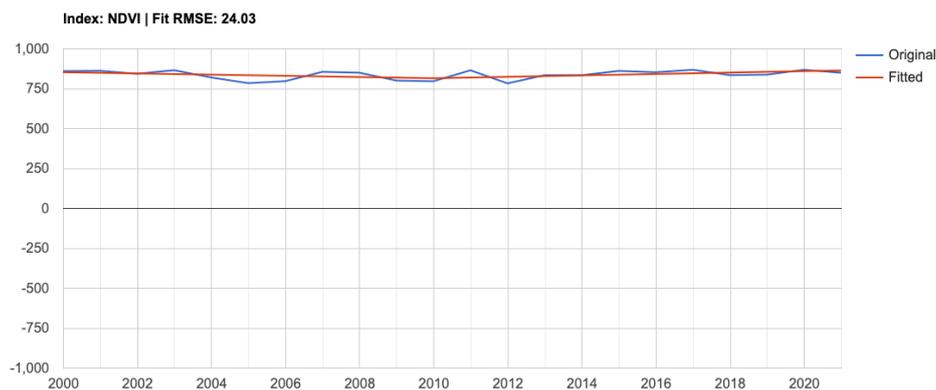


Figura 5.20. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 85 na plataforma do LT-GEE. Fonte: O Autor.

5.4.5. Imóveis Rurais

Foram analisadas 76 amostras de áreas embargadas em imóveis rurais. A análise demonstrou que 54 (71%) amostras tiveram perda de vegetação; 18 (24%) amostras tiveram regeneração; e 4 (5%) amostras se mantiveram constantes (Figura 5.21).

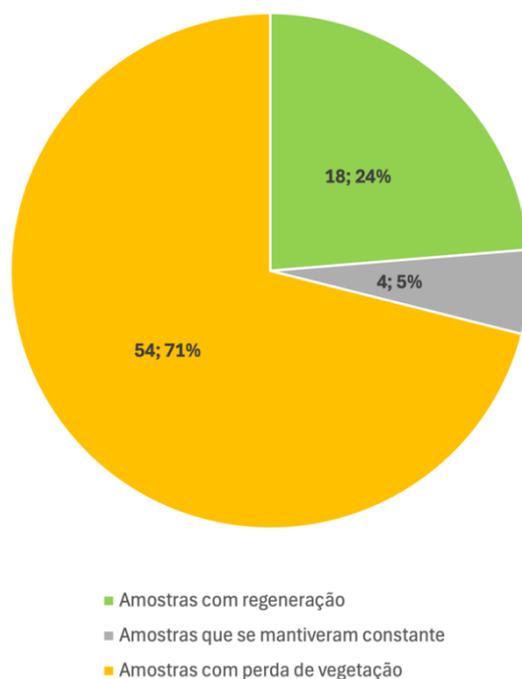


Figura 5.21. Quantidade de amostras em Imóveis Rurais que tiveram perda de vegetação ou regeneração, e respectivas porcentagens. Fonte: O Autor.

A amostra 35 é relativa em uma área embargada em 2009. De 2007 para 2008, a área perdeu bastante vegetação, mas a partir deste ano, a amostra tem uma trajetória de regeneração, mesmo que não tenha alcançado os valores do começo da série. Assim,

considerou-se a amostra como em regeneração (Figura 5.22). O mesmo ocorre com a amostra 49, embargada em 2005 (Figura 5.23); amostra 54, embargada em 2014 (Figura 5.24); amostra 57, embargada em 2008 (Figura 5.25); amostra 60, embargada em 2016 (Figura 5.26); amostra 62, embargada em 2017 (Figura 5.27); amostra 72, embargada em 2017 (Figura 5.28); amostra 77, embargada em 2010 (Figura 5.29); e amostra 84, embargada em 2014 (Figura 5.30).

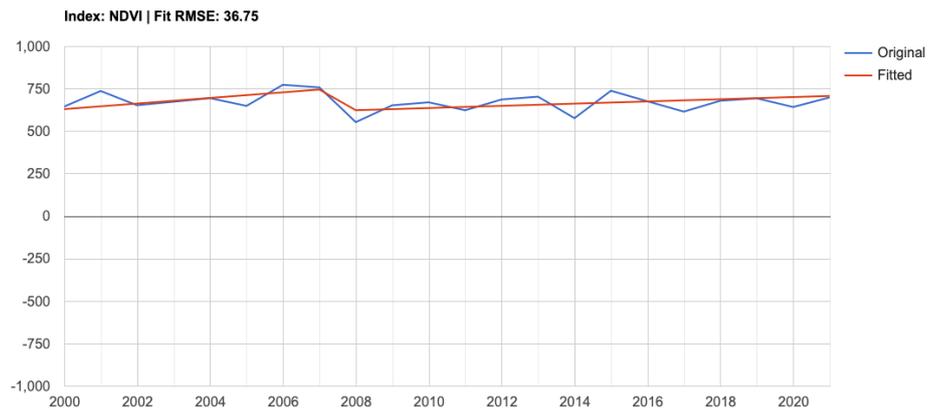


Figura 5.22. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 35 na plataforma do LT-GEE. Fonte: O Autor.

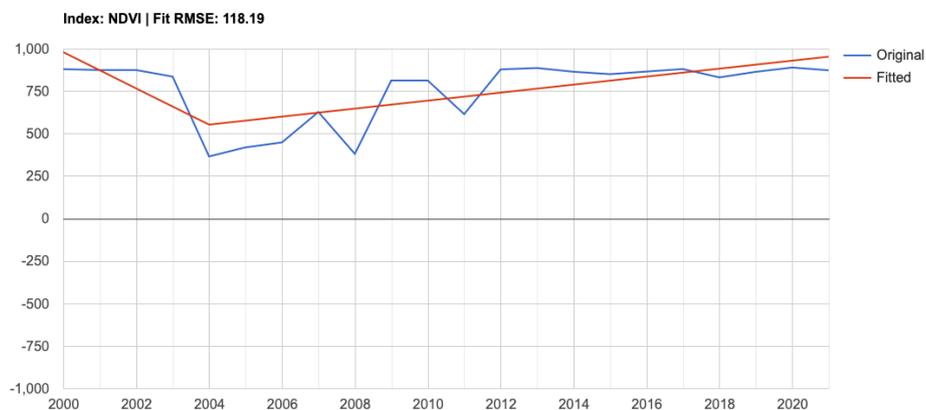


Figura 5.23. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 49 na plataforma do LT-GEE. Fonte: O Autor.

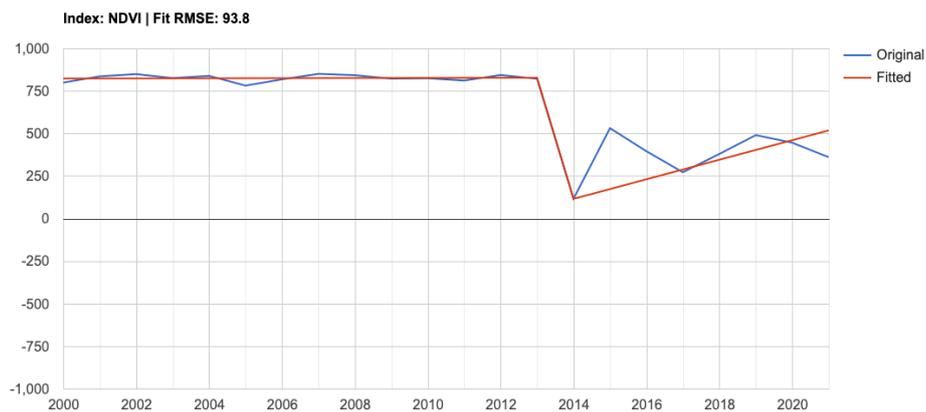


Figura 5.24. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 54 na plataforma do LT-GEE. Fonte: O Autor.

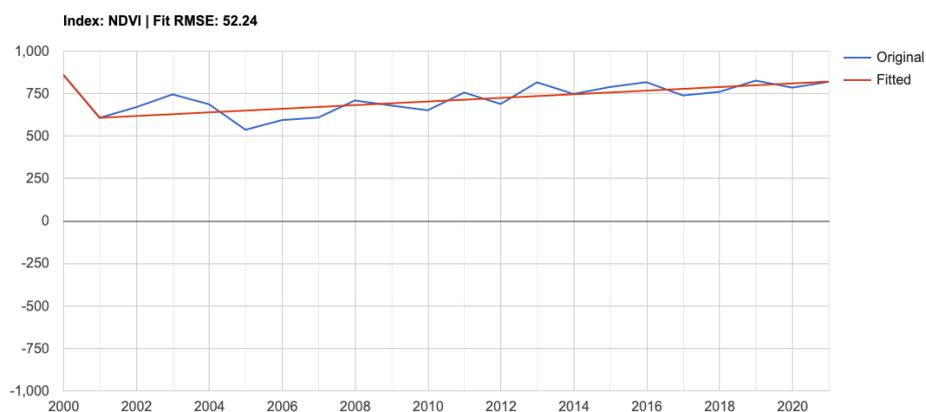


Figura 5.25. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 57 na plataforma do LT-GEE. Fonte: O Autor.

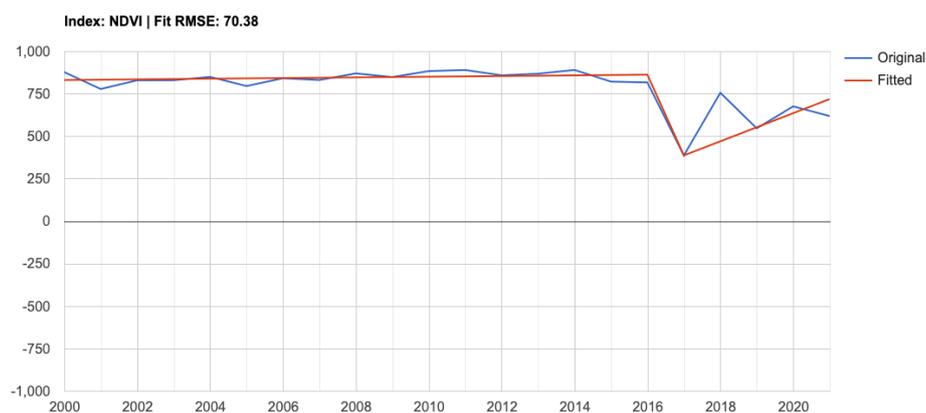


Figura 5.26. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 60 na plataforma do LT-GEE. Fonte: O Autor.

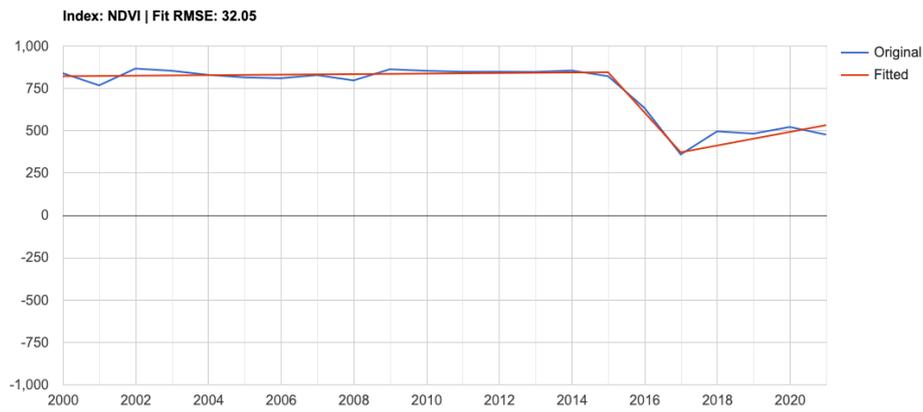


Figura 5.27. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 62 na plataforma do LT-GEE. Fonte: O Autor.

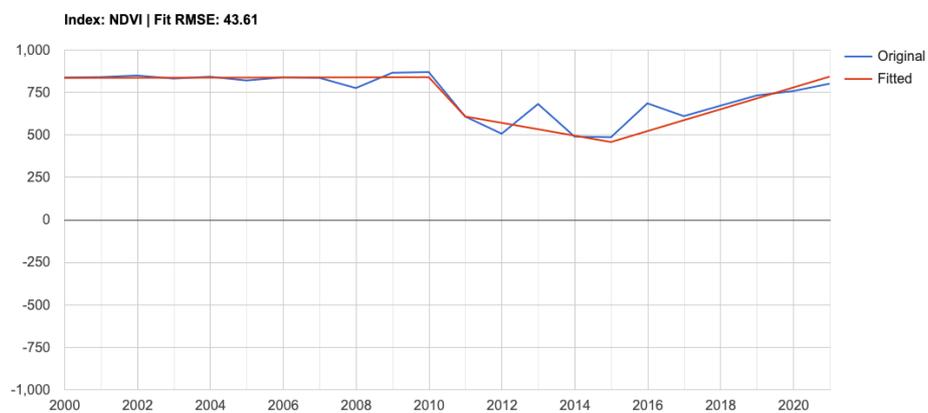


Figura 5.28. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 72 na plataforma do LT-GEE. Fonte: O Autor.

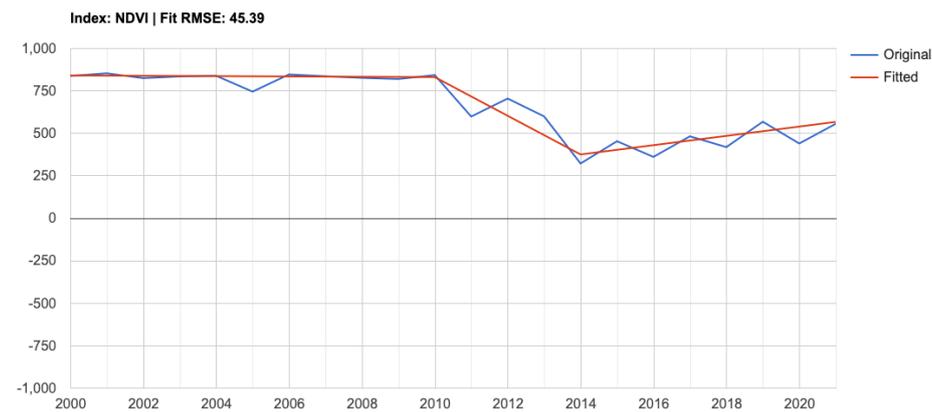


Figura 5.29. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 77 na plataforma do LT-GEE. Fonte: O Autor.

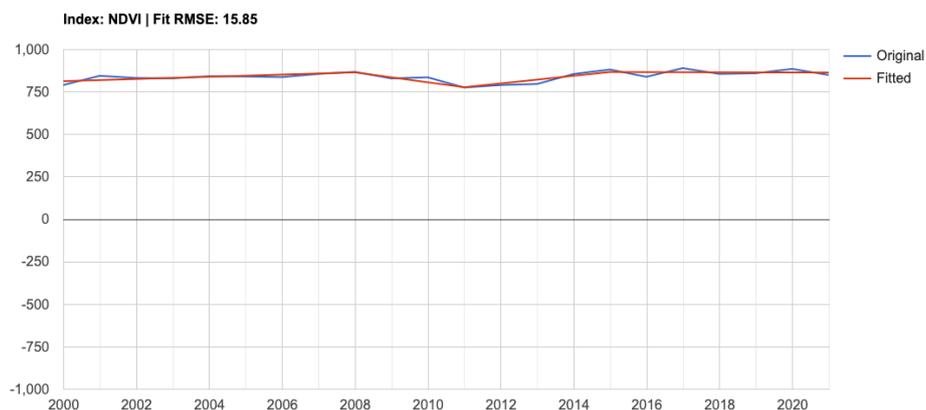


Figura 5.30. Gráfico do índice de vegetação NDVI para a amostra 84 na plataforma do LT-GEE. Fonte: O Autor.

5.4.6. Imóveis Privados Inseridos nas Classes Fundiárias

A análise dos resultados mostra que as Propriedades Rurais é o tipo fundiário com mais amostras com perda de vegetação (Figura 5.31).

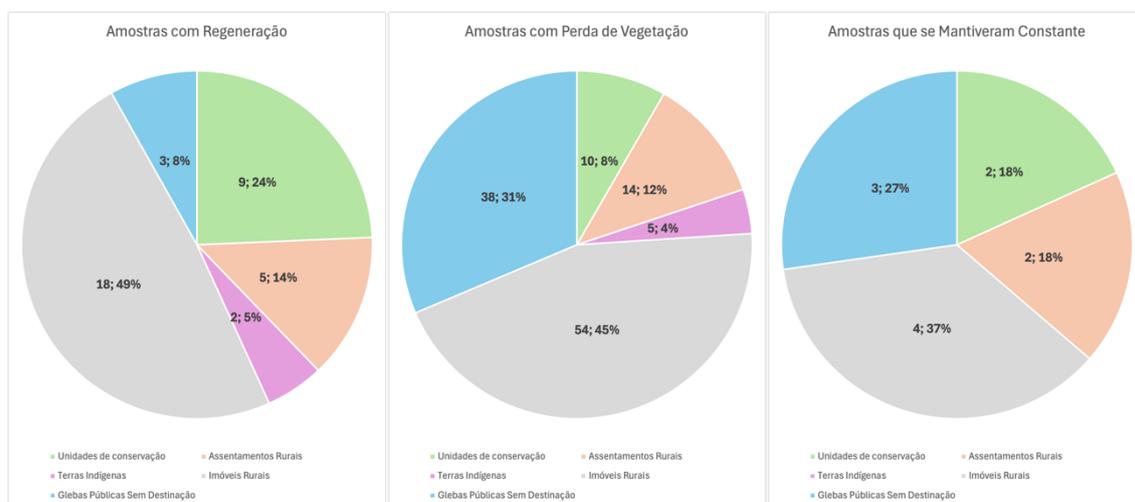


Figura 5.31. Número e porcentagem de amostras com regeneração, com perda de vegetação e com trajetórias constantes nos cinco tipos fundiários. Fonte: O Autor.

No entanto, devemos considerar que muitas das amostras de áreas embargadas em Imóveis Rurais estão contidas nas quatro demais classes fundiárias (Figura 5.32).

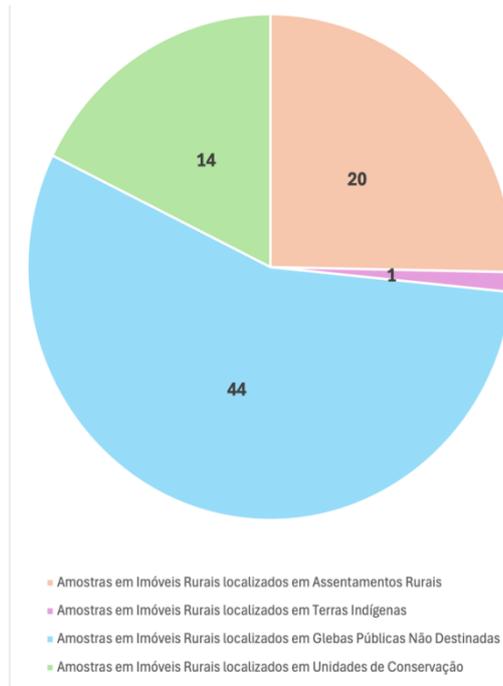


Figura 5.32. Número de amostras em Imóveis Rurais contidas nas demais classes fundiárias. Fonte: O Autor.

Das amostras em Imóveis Rurais localizadas nas demais classes fundiárias, as amostras com mais perda de vegetação estão localizadas em Glebas Públicas não Destinadas. Enquanto as Unidades de Conservação possuem o maior número de amostras com regeneração (Figura 5.33 e Tabela 5.4).

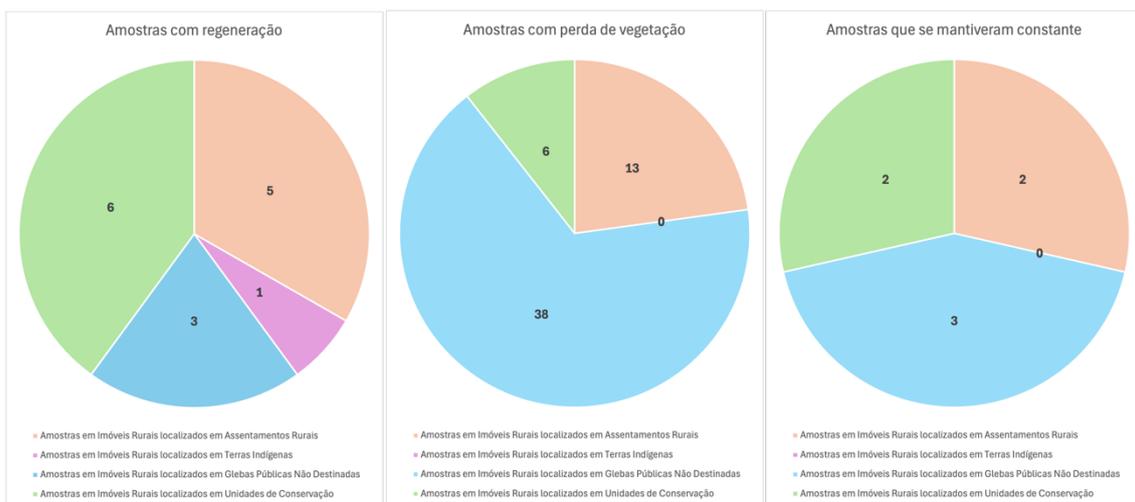


Figura 5.33. Número de amostras em Imóveis Rurais localizadas nas demais classes fundiárias, divididas por amostras com regeneração, amostras com perda de vegetação e amostras com trajetória constante. Fonte: O Autor.

Tabela 5.4. Número de amostras em Imóveis Rurais localizadas nas demais classes fundiárias, divididas por amostras com regeneração, amostras com perda de vegetação e amostras com trajetória constante. Elaborado pelo Autor.

Especificação	Amostras com regeneração	Amostras que se mantiveram constante	Amostras com perda de vegetação	Total
Amostras em Imóveis Rurais localizados em Assentamentos Rurais	5	2	13	20
Amostras em Imóveis Rurais localizados em Terras Indígenas	1	0	0	1
Amostras em Imóveis Rurais localizados em Glebas Públicas Não Destinadas	3	3	38	44
Amostras em Imóveis Rurais localizados em Unidades de Conservação	6	2	6	14

5.5. Discussão

Os resultados demonstraram que, em todos os tipos fundiários, houve mais amostras com perda de vegetação do que com regeneração. Os resultados indicaram que, em terras públicas não destinadas, houve muitas amostras com perda de vegetação em comparação com amostras com regeneração. Da mesma forma, constatou-se que houve mais amostras com perda de vegetação em imóveis rurais sobrepostas à classe fundiária Glebas Públicas não Destinadas. Das classes fundiárias com mais amostras com regeneração, destacam-se as Unidades de Conservação.

Assim sendo, é recomendável que haja uma análise dos motivos pelos quais as áreas embargadas pelo Ibama foram mais eficazes em possibilitar a regeneração florestal nas Unidades de Conservação e das razões pelas quais foram menos eficazes em Glebas Públicas não Destinadas. Outrossim, ficou confirmado que as terras públicas não destinadas devem ser alvos prioritários para a fiscalização das áreas embargadas pelo Ibama dentro do escopo do PPCDAm para o município de Altamira.

5.6. Considerações finais

Neste trabalho, realizou-se um estudo de caso para analisar a eficácia da utilização do LandTrendr para o monitoramento das áreas embargadas pelo Ibama no município de Altamira, no estado do Pará. Analisamos se a ferramenta online gratuita LandTrendr para

o Google Earth Engine (LT-GEE), criada pela Universidade de Oregon (UNIVERSIDADE DE OREGON, 2023), disposta gratuitamente na internet (<https://emaprlab.users.earthengine.app/view/lt-gee-pixel-time-series>), utilizadora de código aberto, por meio da plataforma Google Earth Engine, pode contribuir para a eficácia do PPCDAm.

Concluimos que, apesar de ponderações realizadas durante a pesquisa, a ferramenta teve, de maneira geral, um bom desempenho. Na maior parte das amostras analisadas, as trajetórias realizadas pelo LandTrendr estiveram de acordo com os dados do NDVI e foram dispostas de forma precisa e de fácil análise. Devido ao fato de ser gratuita e conter códigos abertos, e assim livremente replicados e alterados, a ferramenta pode também ser replicada para um projeto da Administração Pública voltada para o controle e monitoramento do meio ambiente.

Assim sendo, conclui-se que o estudo de caso conduzido para o município de Altamira, Pará, pode ser replicado para outros municípios da Amazonia Legal, e não apenas para áreas embargadas, mas também para análise de qualquer pixel de interesse. Similarmente, recomendamos a utilização da ferramenta para auxílio em projetos de monitoramento e controle da regeneração do meio ambiente como o PPCDAm.

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta pesquisa, buscou-se investigar se o LandTrendr disponível na plataforma Google Earthe Engine (LT-GEE) é um mecanismo eficaz para verificar a restauração da vegetação nativa degradada na floresta amazônica. Para responder a essa questão, o LT-GEE foi utilizado para analisar as séries temporais disponíveis nas plataformas SATVeg e MapBiomas. Os dados analisados corresponderam a áreas embargadas pelo Ibama no município de Altamira, Pará, entre 2000 e 2021. Os objetivos iniciais deste estudo foram entender a metodologia proposta pelo *LandTrendr* e analisar a regeneração da vegetação nativa em áreas embargadas pelo Ibama no município de Altamira por meio da aplicação do algoritmo LandTrendr. O primeiro objetivo foi alcançado por meio da análise sistemática dos artigos científicos publicados na literatura sobre LandTrendr.

Resumidamente, o LandTrendr corresponde a um algoritmo criado para detectar tendências de perturbação e de recuperação florestal utilizando séries cronológicas anuais do satélite Landsat. O algoritmo busca capturar tanto os eventos de desvios abruptos, caracterizados pela ocorrência de uma mudança persistente, diferente de uma mudança sutil ou de um ruído espectral. O LandTrendr possui uma estratégia baseada em uma segmentação temporal arbitrária, utilizando segmentos de linha reta para modelar a trajetória espectral, resultando em uma representação simplificada dessa trajetória. Os pontos iniciais e finais dos segmentos são vértices cuja posição temporal e valor espectral fornecem as informações essenciais necessárias para produzir as trajetórias temporais de um pixel e assim descrever as mudanças reais de cobertura da superfície.

O segundo objetivo foi alcançado comparando-se os dados produzidos pelas plataformas SATVeg e MapBiomas. O LT-GEE, por meio da interface do usuário *UI LandTrendr Pixel Time Series Plotter*, mostrou ser um instrumento eficaz para detectar a regeneração da vegetação em áreas embargadas pelo Ibama. A análise das 50 amostras selecionadas no município de Altamira mostrou que 43 apresentaram resultados semelhantes no SatVeg e apenas 7 diferentes. Quanto à questão científica se o *LandTrendr* é um instrumento válido para verificar a restauração da vegetação nativa desmatada ilegalmente e degradada na Amazônia brasileira, a conclusão é a de que a ferramenta é eficaz para examinar se as áreas degradadas da floresta amazônica estão se regenerando ou não.

No âmbito do planejamento da fiscalização do Ibama, a metodologia utilizada nesta pesquisa pode ser replicada para outros municípios e estados do Brasil. Neste trabalho, foi analisada a regeneração de áreas embargadas pelo Ibama, cuja vegetação primária foi retirada ilegalmente. Porém, outros territórios sujeitos a outras formas de degradação como queimadas e efeitos de bordas também podem ser analisados pelo algoritmo LT-GEE. Um exemplo de oportunidade de pesquisa é a utilização do algoritmo LT-GEE para investigar a trajetória de regeneração dentro de uma área degradada por incêndios florestais. Por fim, o algoritmo LT-GEE mostrou ser eficaz no monitoramento da regeneração de áreas que foram desmatadas ou degradadas.

Conclui-se que, apesar de ponderações realizadas durante a pesquisa, a ferramenta teve, de maneira geral, um bom desempenho. Na maior parte das amostras analisadas, as trajetórias realizadas pelo LandTrendr estiveram de acordo com os dados do NDVI, e foram dispostas de forma precisa e de fácil análise. Devido ao fato de ser gratuita e conter códigos abertos, e assim livremente replicados e alterados, a ferramenta pode também ser replicada para um projeto da Administração Pública voltada para o controle e monitoramento do meio ambiente.

Assim sendo, concluímos que o estudo de caso conduzido aqui para o município de Altamira, Pará, pode ser replicado para outras regiões dos biomas brasileiros, e não apenas para áreas embargadas, mas também para análise de qualquer pixel de interesse. Similarmente, recomendamos a utilização da ferramenta para auxílio em projetos de monitoramento e controle da regeneração do meio ambiente como o PPCDAm.

REFERÊNCIAS

- ABDUL, A.; AL-SAYED OMAR, R. Efficiency and effectiveness in management. **Journal of Survey in Fisheries Sciences**, v. 10, n. 3, p. 3382–3392, 2023.
- ALBERT, J. S. et al. Human impacts outpace natural processes in the Amazon. **Science**, v. 379, n. 6630, p. 1–9, 27 jan. 2023.
- ALECIO, M. R.; COSTA, A. J. E. A legalidade da celebração de acordos extrajudiciais em discriminatórias de terras devolutas. In: **Direito contemporâneo: desafios e possibilidades**. Ponta Grossa: Aya, 2023. v. 4, p. 1–248.
- ALMEIDA, C. A. et al. High spatial resolution land use and land cover mapping of the Brazilian legal Amazon in 2008 using Landsat-5/TM and MODIS data. **Acta Amazonica**, v. 46, n. 3, p. 291–302, 2016.
- AMANI, M. et al. Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 13, p. 5326–5350, 2020.
- ANDRÉA, C. D. **Pesquisando plataformas online: conceitos e métodos**. 1. ed. Salvador: EDUFBA, 2020.
- ARAÚJO, I. V.; TÁRREGA, M. C. V. B. Apropriação de terras no Brasil e o instituto das terras devolutas. **RFD - Revista da Faculdade de Direito da UERJ**, v. 1, n. 19, p. 1–25, 2011.
- ARAÚJO, S. M. **Lei de Gestão das Florestas Públicas: Polêmicas e perspectivas**. Brasília: Câmara dos Deputados, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Ergonomia da interação humano-sistema. Parte 11: Usabilidade: Definições e conceitos**. Rio de Janeiro, 2021.
- AZEVEDO, L. S. et al. Análise de mudanças na cobertura vegetal do Pará utilizando o Google Earth Engine. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 7, n. 1, 2021.
- AZEVEDO, T. et al. **Relatório Anual do Desmatamento no Brasil**. São Paulo: [s.n.]. Disponível em: <<http://alerta.mapbiomas.org>>.
- BARRETO, A. M. A Constituição Federal de 1988 e a posse de terras públicas rurais. **Revista Direito e Liberdade**, v. 14, n. 1, p. 47–72, 2012.
- BARRETO, J. S. et al. **Interface humano-computador**. Porto Alegre: SAGAH, 2018.
- BARRETO, P.; ARAÚJO, E.; BRITO, B. **A impunidade de crimes ambientais em áreas protegidas federais na Amazônia**. Belém: IMAZON, jul. 2009.
- BARROSO, L. A.; ALENCAR, G. V. O Cadastro Ambiental Rural (CAR) como instrumento de regularização ambiental em assentamentos de reforma agrária. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 1, n. 1, p. 5–13, 2014.

BASTIN, J.-F. et al. The global tree restoration potential. **Science**, v. 365, n. 6448, p. 76–79, 2019.

BECKER, G. S. Crime and Punishment: An Economic Approach. Em: BECKER, G. S.; LANDES, W. M. (Eds.). **Essays in the Economics of Crime and Punishment**. Cambridge: National Bureau of Economic Research, 1974. p. 268.

BIZZO, E.; FARIAS, A. L. A. Priorização de municípios para prevenção, monitoramento e controle de desmatamento na Amazônia: Uma contribuição à avaliação do Plano de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm). **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 42, p. 135–159, 2017.

BORGES, L. A. C.; REZENDE, J. L. P. DE; PEREIRA, J. A. A. Evolução da legislação ambiental no Brasil. **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, v. 2, n. 3, p. 447–466, 2009.

BRASIL. **Lei n. 5.172, de 25 de outubro de 1966**. Brasília, DF. Diário Oficial da União, 27 out. 1966.

BRASIL. **Lei n. 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Brasília, DF. Diário Oficial da União, 2 set. 1981. Acesso em: 11 abr. 2023

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF. Diário Oficial da União, 5 out. 1988.

BRASIL. **Lei n. 8.629, de 25 de fevereiro de 1993**. Brasília, DF. Diário Oficial da União, 26 fev. 1993.

BRASIL. **Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998**. Brasília, DF. Diário Oficial da União, 13 fev. 1998.

BRASIL. **Lei n. 9.985, de 18 de julho de 2000**. Brasília, DF. Diário Oficial da União, 19 jul. 2000.

BRASIL. **Lei n. 10.267, de 28 de agosto de 2001**. Brasília, DF. Diário Oficial da União, 29 ago. 2001.

BRASIL. **Decreto n. 4.887, de 20 de novembro de 2003**. Brasília, DF. Diário Oficial da União, 21 nov. 2003.

BRASIL. **Lei n. 11.284, de 2 de março de 2006**. Brasília, DF. Diário Oficial da União, 2 mar. 2006.

BRASIL. **Decreto n. 6.063, de 20 de março de 2007**. Brasília, DF. Diário Oficial da União, 20 mar. 2007.

BRASIL. **Decreto n. 6.514, de 22 de julho de 2008**. Brasília, DF. Diário Oficial da União, 23 jul. 2008.

BRASIL. **Lei n. 12.527, de 18 de novembro de 2011**. Brasília, DF. Diário Oficial da União, 18 nov. 2011.

BRASIL. **Lei n. 12.651, de 25 de maio de 2012**. Brasília, DF. Diário Oficial da União, 28 maio 2012.

BRASIL. **Decreto n. 11.687, de 5 de setembro de 2023**. Brasília, DF. Diário Oficial da União, 5 set. 2023.

BRITO, B.; BARRETO, P. A eficácia da aplicação da lei de crimes ambientais pelo Ibama para proteção de florestas no Pará. **Revista de Direito Ambiental**, n. 42, p. 35–65, 2006.

CALDAS, B. et al. Identifying the current and future status of freshwater connectivity corridors in the Amazon Basin. **Conservation Science and Practice**, v. 5, n. 1, p. 1–21, 2023.

CÂMARA, J. B. D. Governança ambiental no Brasil: ecos do passado. **Revista de Sociologia e Política**, v. 21, n. 46, p. 125–146, 2013.

CANTY, M. J.; NIELSEN, A. A. Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery with the iteratively re-weighted MAD transformation. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 1025–1036, 2008.

CARVALHO, T. S.; DOMINGUES, E. P. Projeção de um cenário econômico e de desmatamento para a Amazônia Legal Brasileira entre 2006 e 2030. **Nova Economia**, v. 26, n. 2, p. 585–621, 2016.

CHAVEZ Jr., P. S. Image-based atmospheric corrections — Revisited and improved. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 62, p. 1025–1036, 1996.

CHAZDON, R. Regeneração de florestas tropicais. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi - Ciências Naturais**, v. 7, n. 3, p. 195–218, 2012.

CHAZDON, R.; BRANCALION, P. **Restoring forests as a means to many ends**. American Association for the Advancement of Science, 2019.

CHAZDON, R. L. et al. The potential for species conservation in tropical secondary forests. **Conservation Biology**, v. 23, n. 6, p. 1406–1417, 2009.

CHAZDON, R. L. et al. Monitoring recovery of tree diversity during tropical forest restoration: Lessons from long-term trajectories of natural regeneration. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 378, n. 1867, p. 1–12, 2023.

CHIAVENATO, I. **Fundamentos de administração: os pilares da gestão no planejamento, organização, direção e controle das organizações para incrementar competitividade e sustentabilidade**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2021.

COSTA, F. R. C. et al. The other side of tropical forest drought: do shallow water table regions of Amazonia act as large-scale hydrological refugia from drought? **New Phytologist**, v. 237, n. 3, p. 714–733, 2023.

CROUZEILLES, R. et al. Ecological restoration success is higher for natural regeneration than for active restoration in tropical forests. **Science Advances**, v. 3, n. 11, p. 1–7, 2017.

CRUZ, D. C. et al. An overview of forest loss and restoration in the Brazilian Amazon. **New Forests** Springer Science and Business Media B.V., 2021.

DAMM, Y.; CISNEROS, E.; BÖRNER, J. Beyond deforestation reductions: Public disclosure, land-use change and commodity sourcing. **World Development**, v. 175, p. 1–12, 2024.

DAVIDSON, E. A. et al. The Amazon basin in transition. **Nature**, v. 481, n. 7381, p. 321–328, 2012.

D'AVILA, G. V. M. Averbação da Reserva Legal X Cadastro Ambiental Rural, avanço ou retrocesso. **Revista Eletrônica Direito e Política**, v. 10, n. 1, p. 345–371, 2015.

DEBORTOLI, N. S. et al. Rainfall patterns in the Southern Amazon: A chronological perspective (1971–2010). **Climatic Change**, v. 132, n. 2, p. 251–264, 2015.

DENT, D. H.; WRIGHT, S. J. The future of tropical species in secondary forests: A quantitative review. **Biological Conservation**, v. 142, n. 12, p. 2833–2843, 2009.

ELLWANGER, J. H. et al. Beyond diversity loss and climate change: Impacts of Amazon deforestation on infectious diseases and public health. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 92, n. 1, p. 1–33, 2020.

EMBRAPA AGRICULTURA DIGITAL. **SATVeg**. Campinas, SP.

ESQUERDO, J. C. D. M. et al. SATVeg: A web-based tool for visualization of MODIS vegetation indices in South America. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 175, p. 1–9, 2020.

FAUSTINO, J. C. S.; LIMA, P. V. P. S. Evolução da dinâmica do uso da terra entre 1985 a 2019 no estado do Ceará. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 13, n. 1, p. 195–210, 2022.

FEARNSIDE, P. M. Desmatamento na Amazônia: Dinâmica, impactos e controle. **Acta Amazônica**, v. 36, n. 3, p. 395–400, 2006.

FEARNSIDE, P. M. Desmatamento na Amazônia brasileira: História, índices e consequências. In: **Destruição e conservação da floresta amazônica**. 1. ed. Manaus: Editora do INPA, 2022. p. 1–356.

FERNANDES, B. L.; OLIVEIRA, S. A aplicabilidade do poder de polícia no direito ambiental a partir de suas atuações e restrições. **Revista Jurídica Direito & Realidade**, v. 6, n. 4, p. 1–15, 2018.

OCA, A. F. M. et al. Harmonizing definitions and methods to estimate deforestation at the Lacandona tropical region in Southern Mexico. **Remote Sensing**, v. 14, n. 10, 2022.

OCA, A. I. F. M. et al. An integrated framework for harmonizing definitions of deforestation. **Environmental Science and Policy**, v. 115, p. 71–78, 2021.

FERRAZ JÚNIOR, T. S. A demarcação de terras indígenas e seu fundamento constitucional. **Revista Brasileira de Direito Constitucional**, n. 3, p. 689–699, 2004.

FERREIRA, H. S.; CORLETO, A. F. Desmatamento na Amazônia Legal: Da desarticulação de um plano de ação à arguição de descumprimento de preceito fundamental 760. **Revista Jurídica Luso-Brasileira**, n. 4, p. 751–780, 2023.

FONSECA, I. F.; LINDOSO, D. P.; BURSZTYN, M. Deforestation (lack of) control in the Brazilian Amazon: from strengthening to dismantling governmental authority (1999-2020). **Sustentabilidade em Debate**, v. 13, n. 2, p. 12–31, 2022.

FONSECA, W. C.; RUSCHEL, C. Embargo e suspensão ambiental: Critérios existentes para aplicação. **Revista de Direito Econômico e Socioambiental**, v. 12, n. 2, p. 404–427, 2021.

FREIRIA, R. C. Aspectos históricos da legislação ambiental no Brasil: da ocupação e exploração territorial ao desafio da sustentabilidade. **História e Cultura**, v. 4, n. 3, p. 157–179, 2015.

FREITAS, L. C. S.; CAVALCANTI, L. C. S.; BRAZ, A. M. Avaliação da acurácia das classes de uso e cobertura da terra do MapBiomias (coleção 6) para o município de Carpina (PE). **Caderno Prudentino de Geografia**, v. 2, n. 45, p. 38–52, 2023.

GAO, W. et al. A novel and extensible remote sensing collaboration platform: Architecture design and prototype implementation. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 13, n. 83, p. 1–17, 2024.

GORELICK, N. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 18–27, 2017.

GRISCOM, B. W. et al. Natural climate solutions. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 114, n. 44, p. 11645–11650, 2017.

HASSLER, M. L. A importância das Unidades de Conservação no Brasil. **Sociedade & Natureza**, v. 17, n. 33, p. 79–89, 2005.

HUGUENIN, L.; MEIRELLES, R. M. S. Do período colonial à COP26: breve resgate histórico sobre as mudanças climáticas relacionadas ao uso da terra no Brasil. **Revista Brasileira de Educação Ambiental**, v. 17, n. 5, p. 132–149, 2022.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Biomass** | **IBGE**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/15842-biomass.html>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

IBGE. **Altamira (PA) | Cidades e Estados | IBGE**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pa/altamira.html>>. Acesso em: 26 out. 2023.

ICMBIO - INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. **Biodiversidade Amazônica — Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade**. Disponível em: <<https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/biodiversidade-amazonica>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

INCRA - INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA. **Instrução Normativa n. 15, de 30 de março de 2004**. Brasília, DF. Diário Oficial da União, 17 maio 2004.

INCRA - INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA. **Assentamentos — Incra**. Disponível em: <<https://www.gov.br/incra/pt-br/assuntos/reforma-agraria/assentamentos>>. Acesso em: 12 jun. 2023.

INCRA. INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA. **Instrução Normativa nº 77, de 23 de agosto de 2013**. Brasília, DF. Diário Oficial da União, 23 nov. 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **PRODES - Coordenação-Geral de Observação da Terra**. Disponível em: <<http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/map/deforestation?hl=pt-br>>. Acesso em: 28 jan. 2024.

IPCC. **Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]** (P. Arias et al., Eds.). Geneva, Switzerland: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>>.

JOHANSEN, I. C.; CARMO, R. L. Dengue e falta de infraestrutura urbana na Amazônia brasileira: O caso de Altamira (PA). **Novos Cadernos NAEA**, v. 15, n. 1, p. 179–208, 2012.

KENNEDY, R. E. et al. Implementation of the LandTrendr algorithm on Google Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 10, n. 691, p. 1–10, 2018.

KENNEDY, R. E.; YANG, Z.; COHEN, W. B. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr - Temporal segmentation algorithms. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 12, p. 2897–2910, 2010.

LAPOLA, D. M. et al. **The drivers and impacts of Amazon forest degradation**. American Association for the Advancement of Science, 27 jan. 2023.

LASKOS, A. A.; CAZELLA, A. A.; MAY REBOLLAR, P. B. O Sistema Nacional de Cadastro Rural: história, limitações atuais e perspectivas para a conservação ambiental e segurança fundiária. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 36, 2016.

LAUDARES, S. S. DE A. et al. New contours of the native vegetation protection law of 2012. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 4, p. 1–13, 2019.

LE CLERCQ, J. A.; CEDILLO, C. Numbers of environmental injustice: The measurement of impunity in Mexico. **Ikonos**, v. 26, n. 73, p. 179–200, 2022.

LEMOS, A. L. F.; SILVA, J. A. Desmatamento na Amazônia Legal: Evolução, causas, monitoramento e possibilidades de mitigação através do Fundo Amazônia. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 1, p. 98–108, 2011.

LINHARES, J. M. S.; MONTEIRO, B. M.; BASTOS, W. R. Deforestation patterns and stages of the Southern Amazon agricultural frontier. **Revista Agrogeoambiental**, v. 15, p. 1–15, 2023.

LOPES, C. L.; CHIAVARI, J. **Análise do novo procedimento administrativo sancionador do Ibama e seus reflexos no combate ao desmatamento na Amazônia**. Rio de Janeiro: Climate Policy Initiative. 2021.

LOPES, E. R. N. Aspectos ambientais e históricos do Sistema Nacional de Unidades de Conservação: 12 anos de implantação. **Nature and Conservation**, v. 6, n. 2, p. 6–17, 2014.

LOPES, E. R. N. et al. A importância do profissional habilitado e os riscos associados ao Cadastro Ambiental Rural. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, n. 4, p. 4–25, 2018.

LOPES, M. J. S. et al. Impacto do desmatamento e queima na biodiversidade invisível da Amazônia. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 16, n. 1, p. 1–14, 2023.

LU, D. et al. Change detection techniques. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 12, p. 2365–2401, 2004.

LUCAS, E. W. M. et al. Trends in climate extreme indices assessed in the Xingu river basin - Brazilian Amazon. **Weather and Climate Extremes**, v. 31, p. 1–10, 2021.

MAPBIOMAS. **MapBiomas General “Handbook” Algorithm Theoretical Basis Document (ATDB)**. Disponível em: <https://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/ATBD_Collection_7_v2.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2023.

MAPBIOMAS. **Mapbiomas Brasil**. Disponível em: <<https://brasil.mapbiomas.org/>>. Acesso em: 26 ago. 2023.

MARGULIS, S. **Causes of deforestation of the Brazilian Amazon**. Washington, D.C.: World Bank Working Paper, 2004. v. 22

MARTHA JÚNIOR, G. B.; CONTINI, E.; NAVARRO, Z. **Caracterização da Amazônia Legal e macrotendências do ambiente externo**. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa Estudos e Capacitação, 2011.

MATAVELI, G. et al. Deforestation falls but rise of wildfires continues degrading Brazilian Amazon forests. **Global change biology**, v. 30, n. 2, p. 1–3, 2024.

MATRICARDI, E. A. T. et al. Long-term forest degradation surpasses deforestation in the Brazilian Amazon. **Science**, v. 369, n. 6509, p. 1378–1382, 2020.

MELLO, N. G. R.; ARTAXO, P. Evolução do Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal. **Revista do Instituto de Estudos Brasileiros**, n. 66, p. 108–129, 2017.

MILARÉ, É. **Direito do ambiente**. 10. ed. São Paulo: Editora Revista dos Tribunais, 2015.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA CLIMÁTICA. **Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento Ilegal e Recuperação da Vegetação Nativa (2020-2023)**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2023.

MIRANDA, J. R.; ALVES, M. C. Geometric and radiometric evaluation of remote sensing information in virtual platforms. **Earth Science Informatics**, v. 15, n. 3, p. 1789–1800, 2022.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA. **Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas no Cerrado (PCCerrado) e Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm): fase 2016-2020**. Brasília: MMA - Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2018. v. 3.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA. **Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento da Amazônia Legal (PPCDAm): Fase 5 (2023 a 2027)**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2023.

MOREIRA, R. M. Trends and correlation between deforestation and precipitation in the Brazilian Amazon Biome. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 113, p. 1–10, 2024.

MUTANGA, O.; KUMAR, L. Google Earth Engine Applications. **Remote Sensing**, v. 11, p. 1–4, 2019.

NAKAMURA, A. L. S. Segurança jurídica, boa-fé e terras devolutas. **Revista da AGU**, v. 16, n. 1, p. 35–60, 2017.

NEVES, A. K. et al. Assessment of TerraClass and MapBiomas data on legend and map agreement for the Brazilian amazon biome. **Acta Amazonica**, v. 50, n. 2, p. 170–182, 2020.

NUNES, F. S. M. et al. Lessons from the historical dynamics of environmental law enforcement in the Brazilian Amazon. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 1–12, 2024.

OECD. **An Introduction to Online Platforms and Their Role in the Digital Transformation**. Paris: OECD Publishing, 2019.

OLIVEIRA, G. L. et al. Wild canids and the ecological traps facing the climate change and deforestation in the Amazon Forest. **Ecology and Evolution**, v. 13, n. 6, p. 1–15, 2023.

PIPERNO, D. R.; MCMICHAEL, C.; BUSH, M. B. Amazonia and the Anthropocene: What was the spatial extent and intensity of human landscape modification in the Amazon Basin at the end of prehistory? **Holocene**, v. 25, n. 10, p. 1588–1597, 2015.

PPCDAM. **Plano de Ação para prevenção e controle do desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm): 3a fase (2012-2015) pelo uso sustentável e conservação da Floresta**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2015.

PPCDAM. **Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm) Fase V**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2023.

PRATES, R. O.; BARBOSA, S. D. J. Introdução à teoria e prática da interação humano-computador fundamentada na engenharia semiótica. Em: **Jornadas de atualização em informática 2007**. Rio de Janeiro: PUC-Rio, 2007. p. 263–326.

PREFEITURA MUNICIPAL DE ALTAMIRA. **Prefeitura Municipal de Altamira**. Disponível em: <<https://altamira.pa.gov.br/>>. Acesso em: 25 nov. 2023.

QIN, Y. et al. Carbon loss from forest degradation exceeds that from deforestation in the Brazilian Amazon. **Nature Climate Change**, v. 11, n. 5, p. 442–448, 2021.

RIQUETTI, N. B. et al. Soil erosion assessment in the Amazon basin in the last 60 years of deforestation. **Environmental Research**, v. 236, p. 1–14, 2023.

RODRIGUES, D. B.; LUDWIG, M. B. Cadastro Ambiental Rural como um mecanismo de cumprimento da função socioambiental da propriedade rural. **Revista Direito e Sociedade: Reflexões Contemporâneas**, v. 7, n. 1, p. 101–116, 2016.

ROMÃO, E. et al. Análise temporal do uso e da cobertura do solo nas áreas desflorestadas do município de Altamira, Pará. **Enciclopédia Biosfera**, v. 14, n. 25, p. 113–126, 2017a.

ROMÃO, E. DE P. et al. Análise temporal do uso e da cobertura do solo nas áreas desflorestadas do município de Altamira, Pará. **Enciclopédia Biosfera**, v. 14, n. 25, p. 113–126, 2017b.

ROSALEN, D. L.; MUNHOZ, J. V. C.; MARDEGAN, C. O georreferenciamento de imóveis rurais no município de Jaboticabal-SP. **Revista Ciência em Extensão**, v. 8, n. 3, p. 42–55, 2012.

- SAKAMOTO, T. et al. A crop phenology detection method using time-series MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 96, n. 3–4, p. 366–374, 2005.
- SANT’ANNA, I. T. DE; FERRAZ, D. DA P. G. B.; ALMEIDA, P. M. M. DE. Detecção de mudanças de manguezal com o uso do algoritmo LandTrendr nos manguezais de fundo da Baía de Guanabara - RJ. **Revista Continentes (UFRRJ)**, v. 11, n. 22, p. 46–65, 2023.
- SANTOS, D. I. P. et al. Mudanças climáticas e modo de vida ribeirinho: Bases para a governança de risco no Amazonas. **Revista EDUCamazônia**, v. 16, n. 2, p. 416–438, 2023.
- SANTOS, L. A. C. Utilização dos dados do Cadastro Ambiental Rural na análise de conflitos de uso do solo em Áreas de Preservação Permanente. **Tecnia - Revista de Educação, Ciência e Tecnologia do IFG**, v. 3, n. 1, p. 174–196, 2018.
- SAVITZKY, ABRAHAM.; GOLAY, M. J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. **Analytical Chemistry**, v. 36, n. 8, p. 1627–1639, 1964.
- SCHMIDT, C. Poder de Polícia Ambiental. **Revista da ESDM**, v. 3, n. 6, p. 70–85, 2017.
- SCHMITT, J. **Crime sem castigo: A efetividade da fiscalização ambiental para o controle do desmatamento ilegal na Amazônia**. Tese de doutorado—Brasília: Universidade de Brasília, set. 2015.
- SERRÃO, E. A. O. et al. Climate and land use change: Future impacts on hydropower and revenue for the amazon. **Journal of Cleaner Production**, v. 385, p. 1–16, 2023.
- SILVA, A. F. C. et al. Impactos das alterações no uso e cobertura do solo no Município de Altamira, Pará. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, p. 1–14, 2020.
- SILVA, G.; PUREZA, M. G. B. A demarcação de terras indígenas na Amazônia Legal. **Revista Nupem**, v. 11, n. 22, p. 43–53, 2019.
- SILVA, V. C. S. et al. Marked non-compliance with deforestation embargoes in the Brazilian Amazon. **Environmental Research Letters**, v. 17, n. 5, p. 1–9, 2022.
- SILVA, M. M.; OLIVEIRA, F. A.; SANTANA, A. C. Mudanças socioambientais no uso da terra em Altamira, Amazônia Oriental. **Novos Cadernos NAEA**, v. 20, n. 3, p. 181–202, 2017.
- SILVEIRA, L. B.; WIGGERS, R. Protegendo a floresta, reconfigurando espaços na Amazônia: o caso do Projeto de Assentamento Extrativista Santa Maria Auxiliadora, Humaitá (AM). **Revista Administração Pública**, v. 47, n. 3, p. 671–693, 2013.
- SOARES, K. L.; SILVA, J. B.; OLIVEIRA, A. P. M. O Decreto 4.887/2003: as comunidades quilombolas, aspectos culturais e a interface com os direitos humanos. **Revista Arandu - Norteando Direitos**, v. 1, n. 1, p. 13–44, 2021.

SOUZA, C.; AZEVEDO, T. **MapBiomias General “Handbook”. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD). Collection 8.** São Paulo: MapBiomias, 2023.

SOUZA, C. M. et al. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian Biomes with Landsat archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 2735, p. 1–27, 2020.

SPERANZA, E. A. et al. **Disponibilizando séries temporais de índices vegetativos em aplicações cliente a partir da API SATVeg.** Campinas: Embrapa, 2020.

SUNDQVIST, E.; BACKLUND, F.; CHRONÉER, D. What is project efficiency and effectiveness? **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 119, p. 278–287, 2014.

TERRA, A. A pertinência do conceito de território para análise de assentamentos rurais. **Revista NERA**, v. 22, n. 48, p. 190–205, 2019.

THOMAS, B. L.; FOLETO, E. M. A evolução da legislação ambiental no âmbito das áreas protegidas brasileiras. **Revista Eletrônica do Curso de Direito da UFSM**, v. 8, p. 734–745, 2013.

TRAMONTINA, J.; KUPLICH, T. Floristic-structural characterization of degraded forest in the arc of deforestation, Brazilian Amazon. **Revista Floresta**, v. 54, p. 1–10, 2023.

TRENTIN, B. E. et al. Restauração florestal na mata atlântica: Passiva, nucleação e plantio de alta diversidade. **Ciencia Florestal**, v. 28, n. 1, p. 160–174, 2018.

UNIVERSIDADE DE OREGON. **LandTrendr | LT-GEE Guide.** Disponível em: <<https://emapr.github.io/LT-GEE/landtrendr.html>>. Acesso em: 30 out. 2023.

VALE JÚNIOR, J. F. DO et al. Solos da Amazônia: Etnopedologia e desenvolvimento sustentável. **Revista Agro@ambiente On-line**, v. 5, n. 2, p. 158–165, 2011.

VÁSQUEZ-GRANDÓN, A.; DONOSO, P. J.; GERDING, V. Forest Degradation: When is a forest degraded? **Forests**, v. 9, n. 726, p. 1–13, 2018.

WANG, H. et al. Anthropogenic disturbance exacerbates resilience loss in the Amazon rainforests. **Global Change Biology**, v. 30, p. 1–15, 2024.

WARDLOW, B. D.; KASTENS, J. H.; EGBERT, S. L. Using USDA Crop Progress Data for the Evaluation of Greenup Onset Date Calculated from MODIS 250-Meter Data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 72, n. 11, p. 1225–1234, 2006.

WATSON, E. M. et al. The exceptional value of intact forest ecosystems. **Nature Ecology & Evolution**, v. 2, p. 599–610, 2018.

WECKMÜLLER, R.; ZEBENDE, J. V. J.; VICENS, R. S. Escolha do melhor descritor para a detecção de trajetórias em florestas tropicais utilizando os algoritmos LandTrendr. **Revista Continentes (UFRRJ)**, v. 7, n. 13, p. 68–84, 2018.

WEST, T. A. P.; FEARNSIDE, P. M. Brazil's conservation reform and the reduction of deforestation in Amazonia. **Land Use Policy**, v. 100, p. 1–12, 2021.

ZHOU, J. et al. Comprehensive evaluation of air pollution emission permit allocation: Effectiveness, efficiency, and equity in China's environmental management framework. **Journal of Cleaner Production**, v. 434, p. 1–10, 2024.

ZIDANE, Y. J. T.; OLSSON, N. O. E. Defining project efficiency, effectiveness and efficacy. **International Journal of Managing Projects in Business**, v. 10, n. 3, p. 621–641, 2017.