



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

MIKAELA RAMOS SANTANA

**MODELAGEM DA DINÂMICA ESPACIAL DO DESMATAMENTO NA ÁREA DE
PROTEÇÃO AMBIENTAL TRIUNFO DO XINGU – PA, UTILIZANDO A
PLATAFORMA LAND CHANGE MODELER (LCM)**

Prof.^a Dr.^a ALESSANDRA CARREIRO BAPTISTA

Orientadora

SEROPÉDICA, RJ
JULHO – 2025



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

MIKAELA RAMOS SANTANA

**MODELAGEM DA DINÂMICA ESPACIAL DO DESMATAMENTO NA ÁREA DE
PROTEÇÃO AMBIENTAL TRIUNFO DO XINGU – PA, UTILIZANDO A
PLATAFORMA LAND CHANGE MODELER (LCM)**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Florestal, como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheira Florestal, Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Prof.^a Dr.^a ALESSANDRA CARREIRO BAPTISTA

Orientadora

SEROPÉDICA, RJ
JULHO – 2025



HOMOLOGAÇÃO Nº 15 / 2025 – DEPTOENG (12.28.01.00.00.00.00.44)

Nº do Protocolo: 23083.035550/2025-39

Seropédica-RJ, 04 de julho de 2025.

MODELAGEM DA DINÂMICA ESPACIAL DO DESMATAMENTO NA ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL TRIUNFO DO XINGU – PA, UTILIZANDO A PLATAFORMA LAND CHANGE MODELER (LCM)

MIKAELA RAMOS SANTANA

APROVADA EM: 02 de julho de 2025

BANCA EXAMINADORA:

Profª. Drª. ALESSANDRA CARREIRO BAPTISTA – UFRRJ (Orientadora)

Profª. Drª. PRISCILA DE LIMA E SILVA – UFRRJ (Membro)

Prof. Dr. GUSTAVO BASTOS LYRA – UFRRJ (Membro)

(Assinado digitalmente em 04/07/2025 17:24) (Assinado digitalmente em 05/07/2025 09:29)

ALESSANDRA CARREIRO BAPTISTA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DEPTOENG (12.28.01.00.00.00.00.44)
Matrícula: 1888652

GUSTAVO BASTOS LYRA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptCAlg (12.28.01.00.00.00.00.29)
Matrícula: 1574025

(Assinado digitalmente em 07/07/2025 11:44)

PRISCILA DE LIMA E SILVA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DEPTOENG (12.28.01.00.00.00.00.44)
Matrícula: 3132531

Visualize o documento original em
<https://sipac.ufrrj.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número:
15, ano: **2025**, tipo: **HOMOLOGAÇÃO**, data de emissão: **04/07/2025** e o código
de verificação: **cbb1413467**

Dedico este trabalho ao Mestre dos mestres.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em especial a Deus, sem Ele eu nada seria.

Agradeço a minha orientadora Prof.^a Alessandra Carreiro Baptista pela profissional dedicada que é e pela humanidade que demonstrou em toda trajetória que tivemos juntas, sempre amável, respeitosa e grande incentivadora. Sou grata pelos novos horizontes que pude vislumbrar a partir das suas orientações.

Agradeço a Prof.^a Priscila de Lima e Silva, pois foi por meio das suas aulas que conheci o geoprocessamento e o sensoriamento remoto, e onde nasceu em meu coração o desejo de me aprofundar mais nessa área. Sendo também a responsável pelo meu envolvimento em pesquisas na área como esta monografia, acreditando no meu potencial e me indicando para ser bolsista de iniciação científica da Prof.^a Alessandra.

Agradeço aos meus pais, Maria José Ramos e Edmilson João da Silva Santana, pela paciência que tiveram nesses anos de graduação. Apesar de não terem tido a oportunidade de concluir os estudos ou de se dedicarem a algo que lhes trouxesse satisfação, me proporcionaram estar aqui hoje.

Agradeço as minhas irmãs Michele, Stephany e Yasmim pelo companheirismo e amor fraterno, suas singelas presenças em minha vida tornaram essa trajetória mais valiosa para mim.

Agradeço à Caio Gomes, meu grande amigo, pela parceria nesses anos de graduação e pelas conversas sinceras.

Agradeço a Ana Lídia Xavier, Clarissa Carvalho, Flávia Lemos e Giovanna Souza, pelo convívio, pelas conversas, pelas muitas apresentações em conjunto, pela amizade. Muito obrigada, minhas futuras Engenheiras Florestais.

Agradeço ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica pela bolsa de estudos concedida.

Agradeço a Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro e em especial ao Instituto de Florestas pela oportunidade de me graduar como Engenheira Florestal.

RESUMO

Apesar de ser o maior bioma brasileiro – cobrindo 49% do território nacional e abrigando a maior floresta tropical do mundo – o bioma Amazônico vem apresentando taxas significativas de desmatamento. Devido ao uso e ocupação inadequados da terra, torna-se essencial estudar os impactos ambientais resultantes na região. Para isso, são necessárias ferramentas que apoiem a preservação, o monitoramento, o controle e a avaliação desses impactos, com o objetivo de compreender, acompanhar e restaurar o meio ambiente. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo analisar as mudanças do uso e cobertura da terra (UCT) no período de 1996 a 2023 na Área de Proteção Ambiental Triunfo do Xingu (APATX), que está integralmente no bioma amazônico, e prever as mudanças futuras do UCT da APATX, simulando um cenário para o ano de 2033. O intuito foi analisar o desmatamento local e projetar seus impactos sobre a unidade de conservação, por meio da modelagem e análise das mudanças na cobertura vegetal em um cenário multitemporal. Um cenário atual (2023) foi inicialmente simulado para calibrar o modelo Land Change Modeler (LCM), seguido da geração de um cenário futuro (2033). Foram utilizados mapas temáticos com resolução espacial de 30 metros, classificados pelo projeto MapBiomass para os anos de 1996, 2006, 2016 e 2023. As classes de cobertura da terra incluíram Vegetação Natural, Agropecuária, Áreas Urbanas, Mineração e Corpos d'Água. Também foram utilizados dados em formato vetorial e matricial para a preparação das variáveis explicativas inseridas no modelo: Modelo Digital de Elevação (MDE), declividade, distância de corpos d'água, distância de rodovias, distância de áreas urbanas, distância de áreas de mineração, distância de áreas de agropecuária e mapa de probabilidade de mudança. Após testes e validação, o modelo revelou um aumento significativo na Agropecuária, em detrimento da Vegetação Natural. Foi previsto que, em 2033, a Vegetação Natural na APATX será reduzida em aproximadamente 68,12% em comparação a 2006, sendo majoritariamente convertida para Agropecuária. A área destinada à Agropecuária neste período aumentou de 2.540 km² para 12.209,81 km² - um aumento superior a 380%. O dado mais alarmante é que, nesse cenário, Agropecuária deve ultrapassar a Vegetação Natural dentro da unidade de conservação até 2033, caso não sejam adotadas medidas eficazes de controle territorial, o que coloca em dúvida a efetividade da APATX como unidade de conservação. Conclui-se que a APATX está sob intensa pressão antrópica devido à expansão do desmatamento na região. Os cenários gerados permitiram identificar ameaças e oportunidades para a recuperação ambiental, demonstrando que o LCM é uma ferramenta eficaz para simulações de uso e cobertura da terra.

Palavras-chave: Amazônia, Unidade de Conservação, Uso e Cobertura da Terra, Modelagem Preditiva, Pressão Antrópica

ABSTRACT

Despite being the largest Brazilian biome—covering 49% of the country's territory and home to the world's largest tropical forest—the Amazon biome has been experiencing significant deforestation rates. Due to inadequate land use and occupation, studying the resulting environmental impacts in the region is essential. To this end, tools are needed to support the preservation, monitoring, control, and assessment of these impacts, with the goal of understanding, monitoring, and restoring the environment. In this context, this study aimed to analyze land use and land cover (LUC) changes from 1996 to 2023 in the Triunfo do Xingu Environmental Protection Area (APATX), located entirely within the Amazon biome, and predict future changes in the APATX LUC by simulating a scenario for the year 2033. The goal was to analyze local deforestation and project its impacts on the conservation unit through modeling and analyzing changes in vegetation cover in a multitemporal scenario. A current scenario (2023) was initially simulated to calibrate the Land Change Modeler (LCM), followed by the generation of a future scenario (2033). Thematic maps with a spatial resolution of 30 meters, classified by the MapBiomass project for the years 1996, 2006, 2016, and 2023, were used. Land cover classes included Natural Vegetation, Agriculture, Urban Areas, Mining, and Water Bodies. Data in vector and matrix formats were also used to prepare the explanatory variables inserted into the model: Digital Elevation Model (DEM), slope, distance to water bodies, distance to highways, distance to urban areas, distance to mining areas, distance to agricultural areas, and a change probability map. After testing and validation, the model revealed a significant increase in Agriculture, to the detriment of Natural Vegetation. It was predicted that by 2033, natural vegetation in APATX will be reduced by approximately 68.12% compared to 2006, with the majority being converted to agriculture. The area designated for agriculture increased from 2,540 km² to 12,209.81 km²—an increase of over 380%. The most alarming fact is that, in this scenario, agriculture is expected to surpass natural vegetation within the conservation unit by 2033 if effective territorial control measures are not adopted, which casts doubt on the effectiveness of APATX as a conservation unit. It is concluded that APATX is under intense anthropogenic pressure due to the expansion of deforestation in the region. The scenarios generated allowed us to identify threats and opportunities for environmental recovery, demonstrating that LCM is an effective tool for land use and land cover simulations.

Keywords: Amazon, Conservation Unit, Land Use and Land Cover, Predictive Modeling, Anthropogenic Pressure.

.

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| LISTA DE FIGURAS | ix |
| LISTA DE QUADROS | x |
| LISTA DE TABELAS | xi |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA | 2 |
| 2.1. Contextualização do desmatamento na Amazônia e seus impactos..... | 2 |
| 2.2. Área de Proteção Ambiental Triunfo do Xingu | 3 |
| 2.3. Monitoramento do Uso e Cobertura da Terra..... | 4 |
| 2.3.1. Uso e Cobertura da Terra | 4 |
| 2.3.2. Monitoramento..... | 5 |
| 2.4. Modelagem Dinâmica | 5 |
| 2.4.1. Conceitos de modelagem dinâmica e preditiva..... | 5 |
| 2.4.2. Land Change Modeler - TerrSet | 6 |
| 2.4.2.1. Funcionamento do LCM | 6 |
| 2.4.2.2. Usos do LCM..... | 8 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS | 8 |
| 3.1. Área de estudo | 8 |
| 3.2. Materiais | 10 |
| 3.3. Método..... | 10 |
| 3.3.1. Processamento dos arquivos vetoriais e matriciais | 11 |
| 3.3.2. Aquisição e processamento dos mapas temáticos do MapBiomas | 11 |
| 3.3.3. Elaboração das Variáveis Explicativas | 13 |
| 3.3.4. LCM..... | 13 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 16 |
| 4.1. Resultados da Reclassificação | 16 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.2. | Análise temporal | 17 |
| 4.3. | Modelagem 2023 | 20 |
| 4.4. | Validação | 22 |
| 4.5. | Modelagem 2033 | 27 |
| 5. | CONCLUSÃO | 29 |
| 6. | REFERÊNCIAS | 30 |
| | APENDICE A - Variável Explicativa MDE | 36 |
| | APÊNDICE B – Variável Explicativa Declividade | 36 |
| | APÊNDICE C – Variável Explicativa Distância de Áreas Urbanas | 37 |
| | APÊNDICE D – Variável Explicativa Distância de Corpos d'Água | 37 |
| | APÊNDICE E – Variável Explicativa Distância de Mineração | 38 |
| | APÊNDICE F – Variável Explicativa Distância de Rodovias | 38 |
| | APÊNDICE G – Variável Explicativa Distância de Agropecuária (2006) | 39 |
| | APÊNDICE H – Variável Explicativa Distância de Agropecuária (2016) | 39 |
| | APÊNDICE I – Variável Explicativa Probabilidade de Mudanças (2006) | 40 |
| | APÊNDICE J – Variável Explicativa Probabilidade de Mudanças (2016) | 40 |
| | APÊNDICE K – Disposição Espacial das Unidades de Conservação e Terras Indígenas no entorno da APATX | 41 |
| | Anexo A - Expressões matemáticas para quinze pontos, dos quais todas as outras estatísticas de VALIDATE derivam | 42 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Mapa de localização da área de estudo..... | 9 |
| Figura 2. Região fitoecológica da região de estudos..... | 9 |
| Figura 3. Fluxograma com as principais etapas seguidas na metodologia do projeto. | 11 |
| Figura 4. Critério utilizado na escolha das datas dos mapas temáticos do projeto MapBiomas..... | 12 |
| Figura 5. Mapa de uso e cobertura da terra na área de estudo de 1996 a 2023..... | 18 |
| Figura 6. Gráfico de ganhos e perdas em km ² das classes na área de estudo entre os anos 2006 e 2016. | 21 |
| Figura 7. Mapa da tendência espacial de mudanças em diferentes graus de polinômios: A) polinômio de grau 3; B) polinômio de grau 6; C) tendência de vegetação natural para todas as classes em grau 6. | 21 |
| Figura 8. Mapa predito de 2023 e mapa de referência de 2023. | 23 |
| Figura 9. Comparação das classes mais omitidas na predição de 2023 comparada ao mapa de referência. | 24 |
| Figura 10. Mapa da validação das transições do modelo de 2023. A) Todos os acertos, erros e falsos alarmes. Principais erros, falsos alarmes e acertos: B) Vegetação Natural para Vegetação Natural; C) Agropecuária para Agropecuária; D) Vegetação Natural para Agropecuária; E) Vegetação Natural para Agropecuária. | 25 |
| Figura 11. Distribuição percentual dos acertos, erros e falsos alarmes do mapa predito de 2023..... | 26 |
| Figura 12. Gráfico de saída do módulo Validate. | 27 |
| Figura 13. Predições rigorosa e suave do uso e cobertura da terra para 2033..... | 28 |

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Componentes de concordância e discordância - Validate..... 16

Quadro 2. Comparativo das classes atribuídas pelo MapBiomas na coleção 9, com as respectivas subclasse com as classes correspondentes na reclassificação..... 17

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Evolução do uso e cobertura da terra, em km ² e em porcentagem, na área de estudo (1996, 2006, 2016 e 2023)..... | 19 |
| Tabela 2. Evolução do uso e cobertura da terra, em porcentagem, na APATX (1996, 2006, 2016 e 2023). | 19 |
| Tabela 3. Matriz de Probabilidade de mudanças (2023) – Cadeia de Markov..... | 22 |
| Tabela 4. Comparação entre o mapa de referência e o mapa predito (2023) em relação as áreas de cada classe em km ² e seu erro em porcentagem. | 24 |
| Tabela 5. Matriz de Probabilidade de mudanças (2033) – Cadeia de Markov..... | 28 |

1. INTRODUÇÃO

A região Amazônica enfrenta sérias ameaças devido à degradação da floresta. A pressão sobre seu território tem modificado o seu cenário ao longo dos anos por meio de ações ilegais. Destaca-se o desmatamento ilegal para o estabelecimento de garimpos e para a expansão da agropecuária. Até mesmo ações legalizadas tem favorecido sua vulnerabilidade, como implementação de políticas públicas para “integrar” a região ao restante do país. Tais medidas têm provocado a conversão do uso e cobertura da terra (UCT) de floresta para outros tipos, sobretudo os ligados a agropecuária (Almeida *et al.*, 2022). O desmatamento também tem ocorrido dentro de Unidades de Conservação (UC), locais que foram criados justamente para conter o avanço do desmatamento e proteger a biodiversidade.

Diante dessa problemática, tem sido proposto o monitoramento dessas áreas por meio do uso dos produtos de sensoriamento remoto, os quais estão sendo largamente utilizados visto sua praticidade de operação e o tempo com que os dados podem ser processados (Pavão, 2017; Guidolini *et al.*, 2013). Segundo Leite e Rosa (2012), a informação quanto ao uso e cobertura da terra é a mais proeminente em uma imagem de satélite, sendo atribuído a quem analisa as imagens interpretar corretamente o que cada padrão representa em termos de cobertura e o que isto infere quanto ao tipo de uso da terra.

Esse tipo de análise tem grande relevância visto as modificações antrópicas na paisagem e a interferência direta e indireta nos ecossistemas, sobretudo no que tange a dinâmica do desmatamento nos biomas brasileiros. Sendo os dados obtidos utilizados para o planejamento, monitoramento e conservação dos recursos naturais, como também para a recuperação das áreas afetadas (Barros, 2018). Os modelos preditivos, por sua vez, podem auxiliar aqueles que trabalham diretamente com áreas protegidas, sendo tanto uma ferramenta de apoio ao monitoramento, como de suporte para o planejamento territorial dessas áreas.

Analizar a dinâmica do uso e da cobertura da terra no bioma Amazônico é de extrema relevância para tomadas de decisão sobre o planejamento do território, principalmente por ser o maior bioma brasileiro, representando 49% do território nacional (IBGE, 2025) e possuir a maior floresta tropical do mundo. Dentro desse contexto, encontra-se a Área de Proteção Ambiental Triunfo do Xingu (APATX) no estado do Pará, que foi a UC com maior área desmatada no território brasileiro em 2024 (MapBiomas, 2024a). Esta UC apresenta grande relevância ambiental, localizando-se dentro da Terra do Meio, um local de grandes conflitos territoriais e de enfrentamento direto com o desmatamento Amazônico (Costa, 2013).

Compreender os processos de transição do uso da terra nesta região e os vetores do desmatamento são essenciais para propor cenários futuros, e servir de auxílio na tomada de decisão pelos gestores da UC. A aplicação das técnicas de modelagem preditiva é de grande utilidade quando se deseja antecipar padrões de mudanças na cobertura da terra. Além disso, dado a grande variedade dos modelos preditivos que são empregados para analisar as mudanças do UCT (Vliet *et al.*, 2016), torna-se essencial testar tais modelos visando analisar sua eficiência na modelagem de sistemas naturais e assim propiciar a academia dados relevantes da sua aplicabilidade e qualidade dos resultados.

Nesse contexto, o trabalho em tela objetiva analisar as mudanças no uso e cobertura da terra, na Área de Proteção Ambiental Triunfo do Xingu, na região Amazônica, ao longo do período entre 1996 e 2023. E calibrar um modelo dinâmico espacial (Land Change Modeler do software TerrSet), capaz de simular um cenário para o futuro (2033) com a transição da

cobertura vegetal com vistas a traçar as tendências do crescimento do desmatamento e fornecer informações para o planejamento regional.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Contextualização do desmatamento na Amazônia e seus impactos

A Amazônia é um bioma que se distribui em 9 países da América Latina, sendo o Brasil o país em que se encontra a maior parte de sua extensão (Silva; Rodriguez, 2021). Além disso, a Amazônia brasileira representa aproximadamente 49% do território nacional e abrange integralmente os limites dos estados do Pará, Roraima, Acre, Amapá e Amazonas, e partes dos estados de Rondônia, Maranhão, Mato Grosso e Tocantins (IBGE, 2004). Contudo, o desmatamento neste bioma tem colocado em risco as populações tradicionais, a fauna, e os serviços ecossistêmicos que o bioma proporciona ao Brasil e ao mundo (Pereira; Fernandes; Vieira, 2024).

Compreender os processos que levaram a Amazônia a ter hoje o tipo de desenvolvimento social e econômico é de grande relevância, visto que isto corrobora para um melhor entendimento dos fatores que moldaram a sua dinâmica de desmatamento. Segundo Silva e Silva (2022), desde 1960 têm sido implementado políticas públicas com foco no crescimento econômico da região, o que a levou a ser produtora de matéria prima. Para esses autores esta ação promoveu a conversão dos recursos naturais amazônicos em produtos, tendo por consequência o crescimento do desmatamento no bioma a partir desta nova visão para a Amazônia brasileira.

Em relação a ocupação Amazônica na porção brasileira, admite-se a presença de povos originários na região antes mesmo da colonização (Escada; Amaral; Fernandes, 2023; Ponte; Szlafsztein, 2022). Muitas são as teorias sobre de onde vieram os primeiros povos a habitarem e a data da sua chegada, porém é certo de que esses povos, ali estabelecidos, já mantinham um manejo dos recursos naturais e da floresta em si para o seu sustento e modo de vida (Ponte; Szlafsztein, 2022). No entanto, de acordo com Escada, Amaral e Fernandes (2023, p. 1, tradução nossa): “as transformações históricas não provocaram grandes alterações na paisagem e na diversidade sociocultural e ecológica da região até meados do século XX”.

No entanto, as políticas de ocupação promovidas pelo governo brasileiro intensificaram a presença populacional na Amazônia (Lemos; Silva, 2011), trazendo grandes modificações em seu cenário. De acordo com o projeto Amazônia 2030, considerando a Amazônia Legal, que representa não somente o bioma Amazônico brasileiro, mas toda a extensão dos estados do Acre, Amazonas, Amapá, Pará, Rondônia, Roraima, Tocantins, Mato Grosso e parte do Maranhão, de 1972 a 2021, a população teve um aumento 20,2 milhões de pessoas (IMAZON, 2021). Porém, antes da chegada da grande massa da população é necessário abrir o caminho para o seu estabelecimento, como a abertura de estradas e de terrenos para moradia, por exemplo.

Pelo fato de a Amazônia brasileira ocorrer em vários estados, o desmatamento irá apresentar alguns aspectos diferentes de estado para estado. No entanto, em um estudo feito por Lemos e Silva (2011) sobre o desmatamento na Amazônia Legal até o ano de 2009, analisando os estados separadamente, estes autores chegaram à conclusão de que quatro são as causas principais do desmatamento, sendo elas: 1) a ausência de planejamento territorial, 2) as construções de rodovias, 3) a conversão do uso da terra para agricultura e 4) a conversão do uso da terra para pecuária.

Siqueira-Gay *et al.*, (2020) também elencaram os vetores diretos do desmatamento especificamente para o estado do Pará. Dentre os oitos vetores diretos também se encontram as quatro causas citadas por Lemos e Silva (2011), sendo eles: 1) a construção de estradas; 2) a degradação florestal (por fogo e exploração madeireira); 3) os projetos hidrelétricos; 4) a expansão urbana; 5) a expansão da agricultura e pastagens; 6) a ocupação de terras rurais; 7) a mineração e 8) as mudanças climáticas. Esses autores dão ênfase ao grande destaque socioeconômico do Pará para a Amazônia, além da sua imensa dimensão territorial, também abriga grandes infraestruturas como barragens, rodovias e áreas de exploração mineral.

As rodovias federais e estaduais que cortam o Pará, são segundo Thalê, Poccard-Chapuis e Ruivo (2021), o que estimularam as frentes pioneiras para o estado. De igual modo, Souza *et al.* (2020) relaciona o aumento das taxas de desmatamento no Pará com a criação da Transamazônica e das obras de infraestruturas na BR-163 rodovia Cuiabá-Santarém. Castro, Monteiro e Castro (2004) também discutem como o crescimento do desmatamento está associado às rodovias e ao crescimento de áreas com atividades madeireiras e pecuárias. Nesse processo, segundo eles, a grilagem tem destaque em que ocorre a apropriação indevida das terras:

No entanto, a associação entre madeireiros e fazendeiros é importante pois garante, pela venda da madeira, a realização de um ciclo de capitalização para investimentos na formação e pastos, o avanço da grilagem e incorporação de novas terras e a ampliação das redes de comércio (Castro; Monteiro; Castro, p. 76, 2004).

Além dos impactos ambientais negativos, resultantes de toda essa nova dinâmica imposta à Amazônia nas últimas décadas, também há os impactos provocados diretamente aos povos tradicionais, afetando suas condições de permanência no território e manutenção das suas estruturas sociais e modo de vida (Escada; Amaral; Fernandes, 2023). Sendo assim, os impactos associados ao desmatamento envolvem aspectos tanto de dimensões ambientais quanto sociais. Suas repercussões não se limitam apenas ao Brasil, mas alcançam o mundo, visto que o desmatamento acentua a liberação de gases do efeito estufa.

2.2. Área de Proteção Ambiental Triunfo do Xingu

Um dos meios para combater o desmatamento na Amazônia tem sido a implementação de unidades de conservação (Borges *et al.*, 2007), que são áreas territoriais, incluindo seus recursos ambientais, com características naturais relevantes, criadas e protegidas pelo Poder Público com objetivos de conservação (Brasil, 2002). Existem diferentes categorias que são divididas em dois grupos: as unidades de uso sustentável e as unidades de proteção integral. Estas diferem entre si em relação ao tipo de intervenção permitida na UC. As categorias dentro do grupo de uso sustentável permitem o uso direto dos recursos naturais de modo manejado e ordenado por um plano de manejo, o que infere em ações extrativistas. Já a de proteção integral permite apenas o uso indireto dos seus recursos, sendo também orquestrados por um plano de manejo (Brasil, 2011).

A Área de Proteção Ambiental (APA), por exemplo, é uma categoria de UC que faz parte do grupo de uso sustentável, ela é aplicada geralmente em extensas áreas em que se pode haver terras públicas ou privadas, com certo grau de ocupação antrópica e de biodiversidade singular, visando especialmente a sua proteção (Brasil, 2011). Neste contexto foi implementada na região amazônica no estado do Pará a Área de Proteção Ambiental Triunfo do Xingu, inserida em uma região de grande conflito territorial e pressão antrópica sobre as suas terras

(Costa; Reis, 2017). A APATX tem sua criação datada no final do ano de 2006 pelo Decreto Estadual nº 2.612, de 4 de dezembro de 2006, tendo mais de um milhão de hectares divididos entre dois municípios do Pará, 65% em São Félix do Xingu e 35% em Altamira (Costa; Reis, 2017).

No entanto, a APATX, segundo o Imazon (2017), foi a UC do bioma em que houve maiores taxas de desmatamento entre os anos de 2012 e 2015, dentre as 50 UCs em situações críticas analisadas. Dados do Monitoramento Anual da Supressão de Vegetação Nativa (Prodes), com atualização para o ano de 2024, disponíveis no portal TerraBrasilis, apontam a APATX em primeiro lugar no ranking de incrementos de desmatamento acumulado na UCs da Amazônia (INPE, 2025). Segundo Costa (2013), a APATX situa-se numa região denominada de Terra do Meio, nome atribuído devido a sua localização entre os rios Xingu e Iriri e tem sido um atrativo para o desenvolvimento econômico, porém com efeito crescente de degradação ambiental na região. Ainda segundo o autor esta categoria de UC é vista com preocupação nas diferentes esferas atuantes na área ambiental, porém ele destaca a necessidade de se fazer um estudo que leve em consideração a singularidade do local como motivo para a sua implementação. Em consonância com essa afirmação, Rylands e Brandon (2005, p. 31), discorrem que:

As áreas de proteção ambiental (APAs) disciplinam as atividades humanas de forma a proporcionar o uso sustentável dos recursos naturais e a qualidade ambiental para as comunidades locais, por meio de planos de manejo e zoneamento, incluindo áreas de proteção integral da vida silvestre.

Para esses autores, as APAs são utilizadas como zona tampão entre áreas que possuem grau de conservação integral, como parques e reservas. Sendo, então, a APATX um instrumento de estratégia territorial num lugar já ocupado e que ao seu redor situam-se outras 6 UCs e 3 terras indígenas e uma forte pressão antrópica. E ainda forma um corredor de biodiversidade ao integrar várias áreas protegidas em algum nível.

2.3. Monitoramento do Uso e Cobertura da Terra

2.3.1. Uso e Cobertura da Terra

O uso e a cobertura da terra apesar de serem termos tratadas praticamente sempre em conjunto são distintos em conceito. O uso da terra se refere as destinações feitas pelo homem a porções da terra para determinado fim, seja da paisagem modificada ou não por ação antrópica. Enquanto a cobertura da terra é referente a qual material ou conjunto de materiais, sendo estes naturais ou artificiais, que recobrem a superfície (FAO, 2016), como floresta, água, solo exposto ou material rochoso. Em relação a isso, comprehende-se que para dado uso da terra pode-se ter mais de uma cobertura (Almeida *et al.*, 2025).

Há ainda os casos em que, para um mesmo lugar, o uso e a cobertura da terra podem ser apresentados em classes diferentes, a depender de qual entidade ou mesmo pessoa comum a classificou, essa variação ocorre tanto pelas legendas atribuídas às classes como pelo método de classificação que foi utilizado. Isso é bem apresentado no estudo de Neves *et al.* (2020) que avaliaram os dados do projeto TerraClass e do projeto MapBiomass em relação à concordância entre as classificações de ambos os projetos.

No estudo supracitado, foi apresentado que, no caso do TerraClass, a legenda considera apenas a classe 'floresta'. Já no MapBiomass, há uma discriminação em subclasses, como floresta

aberta, floresta inundada e mangue, o que demonstra um maior refinamento nas classificações. Observam-se também divergências na categorização de uma mesma área, mesmo após a reclassificação realizada para conciliar as classes de cada projeto. Importa destacar que os autores não tinham o intuito de avaliar a acurácia relativa entre os produtos, mas sim analisar o grau de concordância entre eles.

2.3.2. Monitoramento

Os estudos considerando o uso e cobertura da terra têm, por vezes, como objetivo realizar uma análise quanto as mudanças ocorridas, ao longo do tempo, em uma determinada área, entre as classes de UCT definidas. Isso se torna muito importante na perspectiva de gestão dos recursos naturais (Neves *et al.*, 2020), na elaboração de cenários futuros (Silva *et al.*, 2023), na determinação da perda de serviços ecossistêmicos em áreas desmatadas, nas tomadas de decisões quanto ao ordenamento territorial e nas definições de políticas públicas (Fernandes *et al.*, 2021; Reis *et al.*, 2023; Souza Junior *et al.*, 2020).

O Brasil possui alguns sistemas oficiais para o monitoramento da vegetação nativa, como o Monitoramento Anual da Supressão de Vegetação Nativa (Prodes), o Monitoramento Diário da Supressão e Degradação de Vegetação Nativa (Deter) e o Monitoramento Sistêmico da Cobertura e Uso da Terra (TerraClass) (Almeida *et al.*, 2025). Além desses sistemas oficiais, também existem outros projetos como o Projeto de Mapeamento Anual de Uso e Cobertura da Terra (MapBiomass) que disponibilizam dados e mapas que podem ser usados para o monitoramento ambiental de todo o país.

O MapBiomass é uma iniciativa criada em 2015 por universidades, organizações não governamentais (ONGs) e empresas de tecnologia, seu objetivo é produzir mapas anuais de séries temporais de uso e cobertura da terra em todo território brasileiro, tendo uma resolução espacial de 30m (MapBiomass, 2024b). Seus dados são utilizados por órgãos governamentais e ONGs visando o monitoramento ambiental e criação de políticas públicas (Rosa; Shimbo; Azevedo, 2019). Ele também possui uma plataforma, o MapBiomass Alerta, que funciona como sistema de alerta do desmatamento para todo o território brasileiro, os alertas são feitos com base em cruzamento de informações com os sistemas de monitoramento oficiais (Beckmam *et al.*, 2024).

O processamento utilizado é chamado de distribuído e automatizado, o qual utiliza a plataforma Google Earth Engine (GEE) para o processamento dos dados (MapBiomass, 2025a). O projeto produz anualmente, desde 2016, mapas de uso e cobertura da terra que são chamadas de coleções, estando atualmente na 9^a coleção, o mapeamento mais recente possui 28 classes de UCT (MapBiomass, 2024b). O MapBiomass também disponibiliza, além dos mapas e conjuntos de dados usados no seu site oficial, os algoritmos computacionais usados no projeto através do GitHub (<https://github.com/mapbiomas-brazil>) (MapBiomass, 2024b), desse modo qualquer entidade ou pessoa interessada pode ter acesso livre.

2.4. Modelagem Dinâmica

2.4.1. Conceitos de modelagem dinâmica e preditiva

A modelagem dinâmica espacial é usada para simular fenômenos do mundo real, que tenham necessariamente dimensões espaciais e temporais, em um ambiente computacional

(Kawashima *et al.*, 2016). Por meio da análise das mudanças do uso e cobertura da terra é possível entender as transformações ao longo do tempo. Essa análise, integrada às técnicas de modelagem possibilitam a elaboração de cenários futuros (Kumar *et al.*, 2014).

Cenários são imagens alternativas de futuro que facilitam a tomada de decisões. Eles delineiam conjecturas político-econômicas, sociodemográficas, legais, institucionais, ambientais, tecnológicas e outras, que serão responsáveis por desencadear mudanças passíveis de previsão, segundo um grau de certeza, em horizontes de projeto específicos (Kawashima *et al.*, 2016, p. 710).

Na geração e no uso dos modelos preditivos, além de se conseguir antecipar tendências nas variações do UCT ao longo do tempo, também podem proporcionar o desenvolvimento mais assertivo quanto a quais estratégias de gestão territoriais tomar ao se antecipar aos fatores determinantes nessas mudanças (Ramos; Azevedo; Galvanin, 2024). Sendo essas informações úteis para o ordenamento territorial do entorno e dentro das unidades de conservação.

Segundo Kumar *et al.* (2014), a modelagem preditiva voltadas ao uso e cobertura da terra têm tido cada vez mais eficiência nas simulações, sendo isso possível graças aos avanços tecnológicos no sensoriamento remoto e nos métodos de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Dentre os modeladores utilizados para simular estas mudanças, o Land Change Modeler se destaca como um bom simulador de mudanças do uso e cobertura da terra.

2.4.2. Land Change Modeler - TerrSet

Criado com o propósito de propiciar a análise das conversões de terra, o Land Change Modeler (LCM) é uma ferramenta de modelagem de mudanças no UCT (Eastman, 2024a). Nele é possível obter efetivamente as transições entre classes predefinidas da cobertura do solo num período especificado (Hasan *et al.*, 2020). O LCM é um módulo integrante do software TerrSet, o qual foi encomendado pelo *Andes Center for Biodiversity Conservation of Conservation International* (Centro Andes para a Conservação da Biodiversidade), sendo um software de aplicação especializado na mudança de uso da terra dentro do TerrSet, o qual é voltado para atender diversos fins (Eastman, 2006).

Vale ressaltar que o Software TerrSet primeiramente chamava-se Idrisi, nome atribuído como homenagem a um acadêmico, cartógrafo e geógrafo mulçumano de grande relevância na época medieval (Clark CGA, 2024b). Ele foi desenvolvido pela Clark Labs na Clark University no final da década de 1980 (Clark CGA, 2025). Atualmente com a fusão do Clark Labs com o Clark Center for Geospatial Analytics (Clark CGA) foi lançado a versão gratuita do software, denominando TerrSet LiberaGis. Nesse novo programa foram mantidas as ferramentas da versão comercial como o Land Change Modeler, o Earth Trends Modeler e demais ferramentas de edição de dados matriciais, como também foram removidas ferramentas tidas como obsoletas (Clark CGA, 2024a).

2.4.2.1. Funcionamento do LCM

Segundo Eastman (2024a), a interface do LCM envolve seis ferramentas: 1. Análise de Mudanças, usada na análise de mudanças na cobertura da terra entre duas épocas diferentes; 2. Potenciais de Transição, usado na modelagem do potencial para a transição terras; 3. Previsão de Mudanças, nesta ferramenta são realizadas as previsões de mudanças futuras; 4.

Planejamento, realiza a avaliação de intervenções de planejamento; 5. Projeto REED, realiza a estimativa de emissões de gases do efeito estufa; 6. Harmonizar, é usada especificamente para formatação de mapas de cobertura quando estes não são importados no software já padronizados quanto ao fundo da imagem, dimensões espaciais, legendas e classes.

Estas seis ferramentas aparecem no software no módulo LCM como abas e dependendo do objetivo do projeto nem todas são usadas. Contudo, algumas funções somente podem ser iniciadas após a definição de certos parâmetros para o projeto, como ocorre na execução de projetos cujo objetivo é realizar uma análise integrada das mudanças no UCT e a sua projeção para o futuro (Eastman, 2024a). Logo, quando o objetivo do projeto é de prever mudanças no UCT, as três primeiras abas são necessárias (Análise de Mudanças, Potenciais de Transição e Previsão de Mudanças).

Para este caso, é preciso ter imagens raster classificadas com classes padronizadas, de, pelo menos, dois períodos diferentes, sobre a mesma área em questão (Deus, 2013). Dessa forma, é possível analisar as mudanças de um período ao outro. A calibração do modelo consiste em agregar ao sistema dados temporais da área, ou seja, por meio dos mapas que contém a cobertura do solo referente a cada tempo e das variáveis explicativas (fatores que estão ligados aos fenômenos da mudança do UCT da área do estudo). As mudanças de UCT são previstas por meio da Cadeia de Markov e do Perceptron Multicamadas (MLP).

A Cadeia de Markov permite quantificar as mudanças esperadas entre as duas datas propostas para análise, utilizando as variáveis explicativas, o que gera no fim um arquivo de probabilidade de mudanças (Pavão, 2017). Esse arquivo é uma matriz que indica a probabilidade das classes definidas transacionarem para as demais classes (Mishra; Rai; Mohan, 2014). Contudo, embora a Cadeia de Markov forneça a probabilidade de mudança, ela não define onde essas mudanças ocorrerão espacialmente, ou seja, não determina o local (Vick; Bacani, 2019). Por isso, na plataforma LCM, são gerados mapas de adequação de transição pelo treinamento do MLP (Hasan *et al.*, 2020), que é uma rede neural. O MLP testa e define uma grande variedade de transições, sendo assim possível analisar o potencial de transição entre as classes (Silva *et al.*, 2020).

Desse modo, a Cadeia de Markov quantifica as mudanças, enquanto o MLP associado a Cadeia de Markov prevê os locais de maior probabilidade dessas mudanças ocorrerem. Com base nesses parâmetros o modelo é calibrado e usado para fazer a primeira previsão de cenário a qual será usado para validação. O cenário gerado é apresentado como dois mapas de saída, um é chamado de predição rigorosa ou rígida e o outro de predição flexível ou suave. Na previsão rigorosa é utilizado o potencial de transição calibrado e a cadeia de Markov para alocar as mudanças espaciais, enquanto na predição suave é gerado um mapa de vulnerabilidade das áreas a mudança (Eastman, 2024b).

O mapa da predição suave é o agrupamento de todos os potenciais de transição gerados, fornecendo assim uma indicação do grau de que cada área tende a mudar, ou seja, a probabilidade e não uma condição final (Munch, 2019). Enquanto o mapa da predição rigorosa fornece a alocação de classes específicas às áreas, conforme o potencial de transição, sendo realizado por meio do módulo de alocação de terras multiobjetivo (MOLA) que define pesos as transições, a transição de maior peso ponderado é então definida para cada local (Munch, 2019). Dentre esses dois cenários, Eastman (2024a) aborda que a predição flexível é uma avaliação mais abrangente do potencial de mudanças.

Por fim, para validar a predição faz-se necessário atribuir mais um mapa contendo as mesmas especificações dos anteriores (mesma área e mesma classe), esse novo mapa deve ser datado da mesma data da previsão feita na calibração. Portanto, a primeira previsão deve ser de

uma data futura em relação aos dois mapas usados para gerar esse cenário, porém de uma data que já se tenha imagens disponíveis pelos distribuidores de imagem de satélite, para que possa ser feito a validação. Segundo Eastman (2024a, p. 207, tradução nossa): “O painel Validação permite determinar a qualidade do mapa de uso do solo previsto em relação a um mapa da realidade. Isso é feito por meio de uma tabulação cruzada tripla entre o mapa de cobertura do solo posterior, o mapa de previsão e um mapa da realidade”. Validado o modelo pode-se então fazer previsões para anos posteriores.

2.4.2.2. Usos do LCM

O LCM tem sido amplamente usado em pesquisas voltadas a compreensão da dinâmica do uso e cobertura da terra. A facilidade de calibração do modelo, em que não requer muitos dados espaciais, em conjunto com a presença de algoritmos (MLP) e modelos matemáticos probabilísticos (Cadeia de Markov) que proporcionam resultados satisfatórios na previsão de cenários futuros, fazem com que o seu uso seja difundido em diversas partes do mundo (Hasan *et al.*, 2020). Os resultados a partir dos cenários gerados têm sido apresentados como propostas de planejamento urbano e rural com olhar especial para a gestão dos recursos naturais.

Hasan *et al.* (2020) utilizaram o LCM para analisar a expansão urbana no sul da China, como resultado obtiveram uma projeção para 2031 que prevê um aumento das áreas urbanas em detrimento das áreas agrícolas e viveiros de peixes, no entanto as áreas florestais tiveram tendências de aumento, o qual foi atribuído as políticas públicas chinesas de reflorestamento. No Brasil o estudo de Silva *et al.* (2020) tiveram como foco o semiárido nordestino, modelando a bacia do rio Taperoá para o ano de 2035. A previsão apontou para uma tendência de redução da vegetação arbórea-arbustiva na parte nordeste da bacia, porém com aumento desta mesma vegetação na parte oeste da bacia.

Já em estudos voltados ao continente Africano, o LCM foi utilizado para prever mudanças no UCT e os impactos oriundos dela na erosão do solo na bacia hidrográfica de Holota, que se situa na Etiópia. Na simulação do cenário para 2050, Guder e Kagenta (2025), previram que apesar do aumento das áreas urbanas, as áreas florestais praticamente não sofreram alterações, sendo direcionado o crescimento das áreas construídas às áreas anteriormente de cunho agrícola. Em suma, o uso do LCM para previsões de uso e cobertura da terra é transcontinental, usado por especialistas e estudiosos do mundo inteiro.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

A Área de Proteção Ambiental Triunfo do Xingu, conforme pode ser observado na Figura 1, está localizada na região norte do Brasil, na parte sudeste do estado do Pará, com aproximadamente 35% do território na cidade de Altamira e 65% na cidade de São Félix do Xingu. Segundo Silva (2013), a APATX integra o mosaico conhecido como Terra do Meio junto com outras 6 Unidades de Conservação e 3 Terras Indígenas (TI). Além disso, na região a leste da APA, existe uma imensa área ocupada por fazendas (Castro; Monteiro; Castro, 2004) que perpassam ao menos 9 cidades (São Félix do Xingu, Tucumã, Ourilândia do Norte, Água Azul do Norte, Xinguara, Sapucaia, Canãa dos Carajás, Curionópolis e Parauapebas) que influenciam grandemente na dinâmica do avanço da agropecuária na região.

Mapa de Localização da Área de Estudo

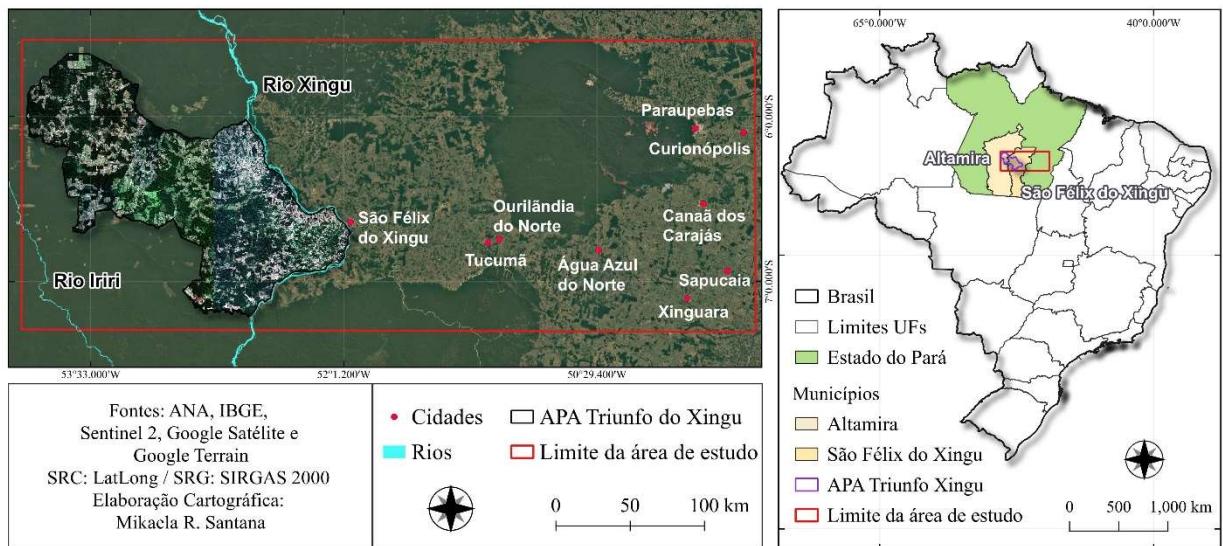


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo.

A área de interesse deste trabalho concentra-se não somente nos limites internos da APATX, mas também no seu entorno. A área de estudo foi delimitada de forma a se identificar a complexidade territorial no entorno da UC, caracterizada pela presença de terras indígenas, mineração e, principalmente, pela pressão antrópica exercida na porção leste da APA. A área de estudo portanto, situa-se em parte na região oeste do Pará e em parte na região sudeste do estado.

Segundo Martorano *et al.* (1993) o estado do Pará apresenta clima tropical, quente e úmido, o relevo da região apresenta algumas variações, contudo não é raro se observar áreas planas em terraços e aluviões. Especificamente para a área de estudo, a vegetação, de acordo com o IBGE (2019), é formada por Floresta Ombrófila Densa Submontana, Floresta Ombrófila Aberta Submontana e com pequenas porções de Savana, além de áreas significativas de transições entre vegetações, essa classificação fitoecológica é apresentada na Figura 2. A parte oeste da área de estudo está sob a bacia Amazônica e a parte sudeste sob a bacia do rio Tocantins-Araguaia (IBGE; ANA, 2021). Tais características demonstram a importância e complexidade ambiental da área de estudo.



Figura 2. Região fitoecológica da região de estudos.

3.2. Materiais

Para a realização deste trabalho, foi utilizado um conjunto de dados geográficos, fundamental para a modelagem espacial e análise multitemporal do uso e cobertura da terra na área de estudo. Esses dados, tanto vetoriais quanto matriciais (raster), foram obtidos de fontes confiáveis e amplamente utilizadas em estudos ambientais, como o Projeto MapBiomas, a Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e o banco de dados TOPODATA. Os materiais selecionados permitiram a construção de mapas temáticos, variáveis explicativas e a execução dos procedimentos de simulação no ambiente SIG, garantindo a robustez das análises realizadas, conforme listado:

- Mapas temáticos da área de estudo com resolução espacial de 30m, obtidas do Projeto MapBiomas por meio do Google Earth Engine.
- Arquivos vetoriais: áreas de mineração, corpos d'água, limites municipais, limites federais, núcleos urbanos e rodovias, ambos obtidos da Base Cartográfica Contínua do IBGE (BC250). Arquivos vetoriais das unidades de conservação e terras indígenas, adquiridos da Agência Nacional de Águas (ANA).
- Modelo Digital de Elevação (MDE), obtido do Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (TOPODATA).
- Os softwares utilizados para os processamentos dos dados foram o QGIS versão 3.34.6-Prizren e TerrSet LiberaGIS © 1987-2024, Clark University, versão 20.0.0. Plataforma Google Earth, Google LLC, 2025.

3.3. Método

As principais etapas seguidas na metodologia do estudo foram ordenadas e esquematizadas na forma de um fluxograma, o qual é apresentado na Figura 3.

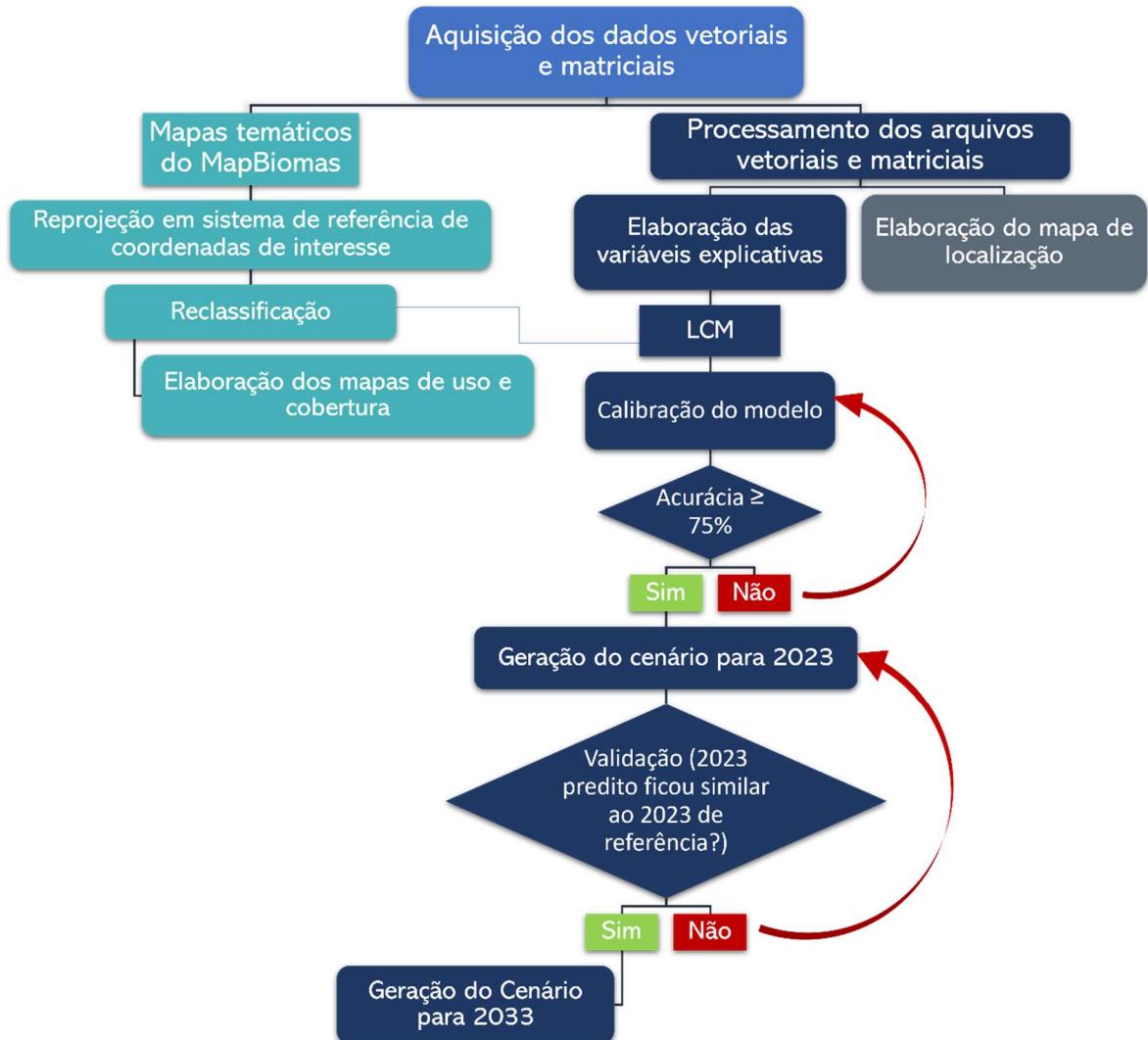


Figura 3. Fluxograma com as principais etapas seguidas na metodologia do projeto.

3.3.1. Processamento dos arquivos vetoriais e matriciais

O conjunto de dados foi transformado para o sistema de referência WGS84 e projetados utilizando-se a Projeção Cônica Equivalente de Albers, com os seguintes parâmetros para a área de estudo: longitude origem: 51° 45'W, latitude origem: 8°S, paralelo padrão 1: 5°N e paralelo padrão 2: 7° 30'S, origem em X: 5.000.000 e origem em Y: 10.000.000 de forma a reduzir as distorções na escala de trabalho adotada. Segundo Câmara *et al.* (2001), essa projeção é apropriada para mapeamentos temáticos e o uso em SIG.

3.3.2. Aquisição e processamento dos mapas temáticos do MapBiomas

Foram adquiridos quatro mapas temáticos classificados da área de estudo, provenientes do Projeto MapBiomas, referentes à Coleção 9, com resolução espacial de 30 metros, por meio da plataforma Google Earth Engine. Para a delimitação da área de estudo, foi criado um retângulo envolvente que abrange tanto a UC quanto as regiões adjacentes, incluindo cidades próximas. A escolha por mapas temáticos já classificados justifica-se pelo fato deste trabalho não ter como foco a avaliação da qualidade dos classificadores, e sim a modelagem espacial.

Como os produtos do MapBiomas são amplamente reconhecidos pela qualidade e confiabilidade, optou-se por sua utilização.

O MapBiomas disponibiliza um *Toolkit*, que consiste em um conjunto de ferramentas e recursos que permitem ao usuário visualizar os dados do projeto, bem como realizar o download por meio de scripts prontos. Na plataforma, é possível selecionar recortes classificados de diversas regiões do Brasil, como estados, municípios e áreas protegidas. Também é possível carregar, diretamente na plataforma, limites geográficos gerados pelo usuário e, com base neles, obter recortes específicos do mapeamento do MapBiomas. Esse recurso foi utilizado para a obtenção dos mapas temáticos da área de estudo. A área de estudo, portanto, não se restringiu aos limites da APATX, mas envolve um recorte geográfico em torno das coordenadas: 53° 58' 9,55" W, 7° 18' 15.83S e 49° 31' 47,56W, 5° 32' 10,25" N.

As datas escolhidas para o estudo da mudança do UCT foram baseadas no ano de criação da UC APATX que ocorreu no final de 2006. Foi determinado um intervalo de 10 anos entre os mapas, com o objetivo de permitir uma análise mais eficiente das mudanças nas classes ao longo do tempo. No entanto, para o mapa mais recente, 2023, esse critério não pôde ser seguido devido à indisponibilidade temporal, assim o último intervalo é de 7 anos, uma vez que foi utilizada o mapa mais recente disponível na plataforma. Dessa forma, os mapas temáticos utilizadas corresponderam aos anos de 1996, 2006, 2016 e 2023. A Figura 4 apresenta o critério de escolha das datas dos mapas temáticos.



Figura 4. Critério utilizado na escolha das datas dos mapas temáticos do projeto MapBiomas.

Com base nesse critério, foi possível definir quais mapas temáticos seriam utilizados na execução deste trabalho. Três deles foram empregadas na fase de testes para a estruturação da modelagem, enquanto os dois mais recentes foram utilizados na previsão do cenário para 2033. Para os testes, foram utilizados os mapas dos anos de 2006 e 2016, com o objetivo de prever o ano de 2023. Já para a simulação do cenário de 2033, utilizaram-se os mapas de 2016 e 2023.

Os mapas temáticos adquiridos passaram por um processo de reclassificação, uma vez que a classificação do MapBiomas abrange diversas classes, sendo fornecida em nível de subclasse. Dessa forma, as subclases foram agrupadas em classes de interesse, totalizando cinco categorias: Vegetação Natural, Agropecuária, Áreas Urbanas, Mineração e Corpos d'Água. Essa padronização de classes foi necessária, pois o Land Change Modeler (LCM) exige que os mapas utilizados no processo tenham a mesma quantidade e os mesmos tipos de classes, além do mesmo recorte geográfico.

A plataforma Google Earth foi utilizada neste trabalho como ferramenta complementar para análise visual e verificação remota de áreas de interesse, com foco na identificação de padrões de uso e cobertura da terra, especialmente em regiões onde foram detectadas transições para áreas urbanizadas ou de mineração. Por meio de imagens de satélite de alta resolução e visualização tridimensional, a plataforma permite observar elementos paisagísticos, infraestrutura, ocupações recentes e indícios de atividades antrópicas com maior detalhamento.

Esse recurso foi fundamental para a validação qualitativa de determinadas classes cartográficas derivadas do MapBiomas, como no caso das “Outras Áreas Não Vegetadas”, cujas características visuais, quando observadas no Google Earth, indicavam a presença de edificações em andamento, justificando seu reagrupamento na classe “Área Urbanizada”. Além disso, o uso do histórico de imagens disponível na plataforma possibilitou a comparação temporal de áreas específicas, fornecendo suporte adicional à interpretação e reclassificação dos dados.

3.3.3. Elaboração das Variáveis Explicativas

As variáveis explicativas, também chamados de variáveis de driver ou variáveis explanatórias ou somente variáveis, são mapas que auxiliam no entendimento das mudanças que ocorreram no uso e ocupação da terra, podendo ser mapas que contém informações sobre o relevo assim como mapas que fornecem informações sobre a distâncias de centros urbanos, estradas e obras de infraestrutura em geral, onde costumam ocorrer os processos antrópicos.

A escolha das variáveis explicativas a serem testadas para a área de estudo foi baseada nos estudos de Lemos e Silva (2011) e Siqueira-Gay *et al.* (2020) que abordam os principais vetores do desmatamento no bioma amazônico e no estado do Pará. Desse modo, foram elaboradas as seguintes variáveis explicativas com base na distância euclidiana dos principais vetores do desmatamento: distância de corpos d’água, distância das rodovias, distância das áreas urbanas, distância das áreas de mineração e distâncias de áreas de agropecuária. Além dessas variáveis também foram atribuídas ao modelo variáveis complementares com vista a melhorar precisão do modelo, como o MDE, a declividade e o mapa de probabilidade de mudanças.

No caso da variável explicativa referente ao Modelo Digital de Elevação (MDE), as cenas foram obtidas por meio do projeto TOPODATA. Foi realizado o mosaico dessas cenas, posteriormente recortado com base na camada vetorial da área de estudo. A partir do MDE, foi extraída a declividade. Enquanto os mapas de probabilidade de mudanças – outra variável explicativa – foram elaborados com base em um mapa de transição entre todas as classes para a classe Agropecuária, no período de 2006 a 2016 e no período de 2016 a 2023. Esses mapas foram gerados determinando a frequência relativa com que diferentes categorias de UCT ocorreram nas áreas que passaram por transição entre as duas datas.

A seleção das variáveis para a geração dos cenários preditos de 2023 e 2033 foram com base nas estatísticas geradas no processo de calibração do modelo.

3.3.4. LCM

A elaboração dos modelos de teste foi feita utilizando-se dos mapas dos anos 2006 e 2016 para prever o ano de 2023, a fim de validá-lo em relação ao mapa do projeto MapBiomas de mesma época. Essa comparação entre os modelos auxiliou na definição dos mapas de

variáveis e das transições e submodelos que seriam utilizados para a geração do modelo de 2033. Os passos realizados em cada teste de calibração e validação são descritos a seguir.

3.3.4.1. Calibração do modelo de teste

No módulo LCM do software TerrSet LiberaGis, na aba *Change Analysis*, foi criado um projeto e inseridas os mapas reclassificados de 2006 e 2016, com o objetivo de analisar as mudanças no uso e cobertura da terra. A partir da introdução desses mapas, foram gerados gráficos e mapas de ganhos e perdas das classes entre os anos, a fim de avaliar as transições. Selecionou-se a opção de omitir transições inferiores a mil hectares, com o intuito de modelar apenas as mudanças mais significativas. Dessa forma, foi possível observar as tendências espaciais de alteração entre as classes, sendo gerados dois mapas de tendência, variando apenas o grau do polinômio entre eles (3º e 6º grau), mas mantendo-se o foco nas transições de maior interesse – especialmente as alterações de Vegetação Natural para Agropecuária.

Esses polinômios são utilizados para ajustar uma superfície matemática que representa a probabilidade espacial de mudança, com base nas transições detectadas. Polinômios de grau mais baixo, como o de 3º grau, produzem superfícies mais suaves e generalizadas, adequadas para representar tendências mais amplas. Já o polinômio de 6º grau permite um ajuste mais detalhado e sensível a variações locais, podendo capturar padrões de transição espacial mais complexos e pontuais (Eastman, 2024a). A escolha entre diferentes graus de polinômio auxilia na compreensão do comportamento espacial dos vetores de mudança, sendo ambos mantidos neste estudo para comparação, sem alterar o foco principal, que foram as transições da classe Vegetação Natural para Agropecuária.

Após a definição desses parâmetros, prosseguiu-se para a etapa seguinte. Na aba *Transition Potentials*, as transições dominantes – que compartilham as mesmas variáveis explicativas como fatores de transição – foram agrupadas em um único submodelo. Esse tipo de agrupamento é viável apenas para análises com a rede neural MLP (*Multilayer Perceptron*), a qual permite modelar múltiplas transições simultaneamente, desde que tenham as mesmas causas motrizes (Eastman, 2024b). Foram adicionadas ao modelo as oito variáveis explicativas, elaboradas conforme descrito na seção 3.3.3. O submodelo foi executado utilizando a rede neural MLP, mantendo-se os parâmetros padrão na primeira tentativa, com amostragem de dez mil pontos por classe, dos quais metade foi utilizada para treinamento e metade para teste.

Para avaliar a performance do modelo, é gerado, ao final da execução, um arquivo em formato HTML com estatísticas do processo de aprendizagem. Durante a execução, as variáveis são testadas de três maneiras: em conjunto, individualmente e mantendo todas constantes, exceto uma. No último caso, o modelo é executado sem uma determinada variável, a fim de avaliar se sua ausência interfere no resultado. Caso não haja impacto, essa variável pode ser descartada, promovendo uma modelagem mais criteriosa. Em conjunto a essas estatísticas também foi observado o poder explicativo das variáveis explicativas.

Segundo o Clark CGA (2024c), o modelo avalia o poder explicativo das variáveis por meio do Índice Explicativo (*Explanatory Ratio – ER*), utilizando abordagens distintas para variáveis qualitativas e quantitativas. Para variáveis qualitativas, como o mapa de probabilidade de mudanças, o ER é calculado com base na proporção de pixels que sofreram transição em cada classe da variável. Se essas proporções forem semelhantes à média geral da transição, a variável possui baixo ou nenhum poder explicativo. Em contraste, se a transição se concentrar em poucas classes, o poder explicativo é considerado alto. Um valor 0 indica ausência total de

explicação (todas as classes apresentam a mesma proporção da média), enquanto um valor 1 representa explicação perfeita (apenas uma classe contém todos os pixels que transitaram).

Para variáveis quantitativas, o modelo as converte em categorias com 10 classes baseadas em quantis (Clark CGA, 2024c). Considerando, por exemplo, a transição de “Vegetação Natural” para “Agropecuária” (desmatamento) e a variável “distância das rodovias”, são calculados, para cada classe: o número de pixels desmatados, a área total, o desmatamento esperado (com base na proporção geral da transição) e a diferença absoluta entre o valor real e o esperado.

A soma dessas diferenças absolutas é comparada àquela que ocorreria em um cenário ideal – no qual uma única classe explicaria perfeitamente a transição. A razão entre os dois valores define o ER. Quanto mais próximo de 0, menor o poder explicativo da variável; quanto mais próximo de 1, maior sua capacidade de explicar a transição.

Sendo assim, novos testes foram realizados, inicialmente repetindo o modelo com os mesmos parâmetros e, posteriormente, removendo individualmente variáveis com menor influência. O tamanho da amostra por classe também foi aumentado em dez mil pontos a cada nova tentativa, a fim de verificar se tais ajustes melhorariam a acurácia. Diversos testes foram realizados até que se alcançou uma acurácia na calibração do modelo superior a 75%, que é recomendada por Eastman (2024b). Segundo Vliet *et al.* (2016) a calibração de um modelo não está somente relacionada a primeira definição de parâmetros, mas também aos ajustes feitos com base nas observações dos resultados preliminares.

3.3.4.2. Previsão e validação do modelo de teste

Com o modelo calibrado, passou-se para a etapa de previsão de mudanças, na aba *Change Prediction*. Nessa fase, foi escolhida a Cadeia de Markov como modelo matemático para estimar a probabilidade de transição. Uma matriz de transição foi gerada, indicando a probabilidade de uma classe mudar para outra no futuro ou permanecer inalterada.

A partir dessa matriz, foi gerado um cenário predito para o ano de 2023, para o qual se dispunha de um mapa considerado como o mapa de referência para 2023. Assim, para validar o modelo, foi realizada uma tabulação cruzada tripla, entre o mapa de cobertura terrestre posterior, o mapa de previsão e o mapa do programa MapBiomas. A partir dessa tabulação, foi gerado um mapa apresentando os acertos, os erros e os falsos alarmes do modelo. Na legenda do mapa de validação, podem ser atribuídas três cores para as classes: verde, acertos (*hits*), onde o modelo já havia previsto a mudança; vermelho, erros (*misses*), para os locais onde o modelo não havia previsto a mudança; e amarelo, alarmes falsos (*false alarm*), onde o modelo previu a mudança, mas ela não ocorreu.

A validação estatística foi realizada pelo módulo *Validate*, o qual fornece sete componentes de concordância e discordância (Quadro 1) para responder as seguintes questões: “Qual a concordância entre um par de mapas em termos da quantidade de células em cada categoria? Qual a concordância entre um par de mapas em termos da localização das células em cada categoria? (Clark CGA, tradução nossa, 2024d)”. Este módulo também fornece o Índice de Concordância Kappa padrão (KIA ou Kstandard) e mais três estatísticas: Kappa para ausência de informação (Kno), Kappa para localização em nível de célula de grade (Klocation) e Kappa para localização em nível de estrato (KlocationStrata) (Clark CGA, 2024d).

Quadro 1. Componentes de concordância e discordância - *Validate*

| Componente | Significado | Definição |
|--|---|--|
| Agreement due to chance | Concordância devido ao acaso | $P(p)-P(m)$ |
| Agreement due to quantity | Concordância devido à quantidade | $P(m)-K(m)$ |
| Agreement due to location at the stratified level | Concordância devido à localização no nível estratificado | $K(m)-M(m)$ |
| Agreement due to location at the grid cell level | Concordância devido à localização no nível da célula da grade | $\text{MAX } [M(m)-H(m), 0]$ |
| Disagreement due to location at the grid cell level | Discordância devido à localização no nível da célula da grade | $\text{MAX } [H(m)-N(m), 0]$ |
| Disagreement due to location at the stratified level | Discordância devido à localização no nível estratificado | If $\text{MIN } [N(n), N(m), H(m), M(m)] = N(n)$, then $\text{MIN } [N(m)-N(n), H(m)-N(n), M(m)-N(n)]$, else 0 |
| Disagreement due to quantity | Discordância devido à quantidade | $\text{MIN } [N(n), N(m), H(m), M(m)]$ |

Adaptado de Clark CGA, 2024d. No Anexo A encontram-se as formulações matemáticas correspondentes a cada uma das expressões.

A validação, assim como procedimentos de álgebras de mapas, fora realizada para detectar os erros e analisar possíveis mudanças na geração dos modelos a fim de gerar modelos melhores e mais condizentes com a realidade encontrada em 2023 pelo MapBiomas.

3.3.4.3. Calibração e predição do cenário de 2033

Após a validação do cenário predito para 2023 e aceito o resultado mais favorável, seguiu-se para a calibração e predição do cenário para 2033. As etapas seguidas na calibração são as mesmas descritas na seção 3.3.4.1, em que foi alterado apenas o ano das imagens de referência para 2016 e 2023. Calibrado o modelo, foi gerado o cenário para o ano de 2033.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Resultados da Reclassificação

Na reclassificação dos mapas temáticos do MapBiomas, o mapa de 1996 teve uma redução de 12 subclasses para 5 classes, enquanto os mapas dos anos de 2006, 2016 e 2023 passaram de 13 subclasses para 5 classes. O Quadro 2 apresenta a classificação original do MapBiomas, incluindo as subclasses para a área de estudo, em comparação com as novas classes resultantes do processo de reclassificação.

As classes “Floresta” e “Vegetação Herbácea e Arbustiva” foram agrupadas para formar a classe “Vegetação Natural”, uma vez que ambas são alvos das frentes de desmatamento, foco principal deste estudo. Já a classe “Área Não Vegetada” foi desmembrada em duas novas categorias, com o objetivo de avaliar separadamente as transições relativas às áreas urbanizadas

e à mineração. Conforme abordado por MapBiomas (2025b), a subclasse “Outras Áreas Não Vegetadas”, na Amazônia, pode representar tanto áreas em expansão urbana quanto de mineração. Diante disso, optou-se por agrupá-la na classe “Área Urbanizada”, visto que, ao serem observadas por meio do Google Earth, essas áreas apresentavam edificações em andamento.

Quadro 2. Comparativo das classes atribuídas pelo MapBiomas na coleção 9, com as respectivas subclasse com as classes correspondentes na reclassificação.

| Classes - MapBiomas | Subclasse - MapBiomas | Classes na reclassificação |
|--------------------------------|--|----------------------------|
| Floresta | Formação Florestal | Vegetação Natural |
| | Formação Savânica | |
| | Floresta Alagável | |
| Vegetação Herbácea e Arbustiva | Campo Alagado e Área Pantanosa | |
| | Formação Campestre | |
| | Afloramento Rochoso | |
| Agropecuária | Pastagem | Agropecuária |
| | Lavoura Temporária - Soja | |
| | Lavoura Temporária - Outras Lavouras Temporárias | |
| Área Não Vegetada | Área Urbanizada | Área Urbanizada |
| | Outras Áreas Não Vegetadas | |
| | Mineração | Mineração |
| Corpo D'água | Rio, Lago e Oceano | Corpos D'água |

4.2. Análise temporal

Na Figura 5 é apresentado o mapa de uso e cobertura da terra da área de estudo para cada ano analisado. Por se tratar de uma área extensa, o mapa contém ampliações que visam destacar as classes e suas evoluções em regiões específicas. A análise temporal da área evidencia um expressivo aumento da classe Agropecuária e uma redução significativa da classe Vegetação Natural, tanto dentro quanto fora da APATX.

As perdas da Vegetação Natural em toda a área de estudo nos períodos analisados – 1996 a 2006, 2006 a 2016 e 2016 a 2023 – foram de 13,57%, 3,65% e 7,04%, respectivamente, em relação a área total. Esses percentuais mostram que a maior perda de área da Vegetação Natural ocorreu no intervalo de 1996-2006, antes da criação da APATX. A partir do ano de criação da APATX as perdas diminuíram na área de estudo, no entanto no período de 2016 e 2023 houve novamente um crescimento na perda de área dessa classe. Os percentuais e áreas totais em km² de cada classe por ano analisado estão demonstrados na Tabela 1.

Uso e Cobertura da Terra na Área de Estudo - 1996 a 2023

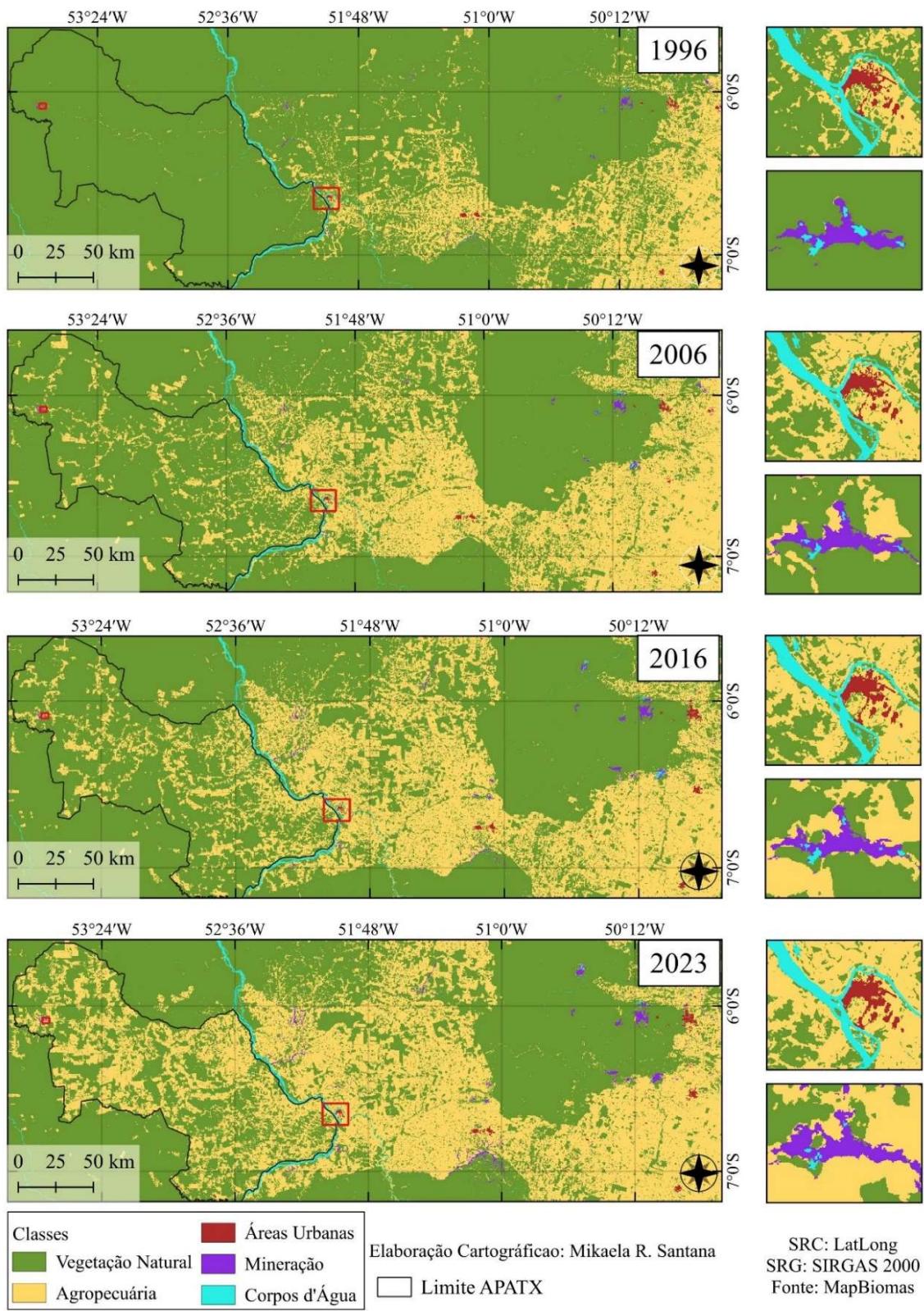


Figura 5. Mapa de uso e cobertura da terra na área de estudo de 1996 a 2023.

Tabela 1. Evolução do uso e cobertura da terra, em km² e em porcentagem, na área de estudo (1996, 2006, 2016 e 2023).

| Classe | Área em km ² (1996) | Área em % (1996) | Área em km ² (2006) | Área em % (2006) | Área em km ² (2016) | Área em % (2016) | Área em km ² (2023) | Área em % (2023) |
|--------------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|
| Vegetação Natural | 80.371,35 | 84,26 | 67.427,65 | 70,69 | 63.949,10 | 67,04 | 57.236,43 | 60,01 |
| Agropecuária | 14.189,55 | 14,88 | 27.110,34 | 28,42 | 30.416,81 | 31,89 | 36.867,81 | 38,65 |
| Áreas Urbanas | 103,52 | 0,11 | 114,52 | 0,12 | 157,47 | 0,17 | 222,99 | 0,23 |
| Mineração | 110,71 | 0,12 | 135,06 | 0,14 | 251,43 | 0,26 | 444,05 | 0,47 |
| Corpos d'Água | 610,19 | 0,64 | 597,75 | 0,63 | 610,51 | 0,64 | 613,97 | 0,64 |

As classes Mineração e Áreas Urbanas tiveram maiores acréscimo em área em 2023. Já a classe Corpos d'Água teve pouca variação se mantendo em níveis percentuais praticamente estáveis ao longo dos anos. Contudo, ao analisar somente a APATX, como é possível observar na Tabela 2, as classes que tiveram variações consideráveis em suas áreas entre as quase quatro décadas de estudo foram apenas Vegetação Natural e Agropecuária, sendo que quase metade da área de Vegetação Natural transitou para Agropecuária. Apesar da Mineração e da Áreas Urbanas também crescerem de 2016 para 2023 seus percentuais ficaram abaixo de 0,1%.

Tabela 2. Evolução do uso e cobertura da terra, em porcentagem, na APATX (1996, 2006, 2016 e 2023).

| Classe | Área em % (1996) | Área em % (2006) | Área em % (2016) | Área em % (2023) |
|--------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Vegetação Natural | 98,87 | 84,68 | 74,42 | 54,42 |
| Agropecuária | 0,92 | 15,12 | 25,37 | 45,27 |
| Áreas Urbanas | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,05 |
| Mineração | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,06 |
| Corpos d'Água | 0,18 | 0,16 | 0,17 | 0,19 |

A análise dos dados apresentados nas Tabelas 1 e 2 permite identificar tendências significativas nas mudanças de uso e cobertura da terra tanto na região como um todo, quanto especificamente na APATX. Entre os anos de 2006 e 2023, a classe de Vegetação Natural apresentou uma expressiva redução na área de estudo, passando de 67.427,65 km² (70,69%) para 57.236,43 km² (60,01%). O que representa uma perda absoluta de 10.191,22 km² e uma redução relativa de aproximadamente 15,11% em relação à área de vegetação existente em 2006. No interior da APATX, a redução foi ainda mais acentuada: a cobertura de Vegetação Natural caiu de 84,68% em 2006 para 54,42% em 2023, o que representa uma redução de 30,26 pontos percentuais, correspondente a uma perda relativa de aproximadamente 35,73% em relação à área de vegetação em 2006.

Ao comparar as perdas 10 anos antes da criação da APATX e 10 depois da sua criação, tem-se uma leve redução no interior da APA. De 1996 a 2006 a perda relativa da Vegetação Natural foi de aproximadamente 14,35%, já de 2006 a 2016 a perda relativa foi 12,12%. No entanto para o último período analisado houve um aumento considerável, a Vegetação Natural que representava 74,42% da área total da APA, passou a representar apenas 54,42%, uma redução relativa de 26,88%. Esses dados evidenciam que, mesmo após a criação da unidade de

conservação em 2006, a Vegetação Natural continuou em declínio, o que sugere limitações na efetividade da UC em conter o avanço das pressões antrópicas.

A classe Agropecuária, por sua vez, caracterizou-se por forte expansão ao longo do período analisado. Na área total da região, essa classe passou de 14.189,55 km² (14,88%) em 1996 para 36.867,81 km² (38,65%) em 2023, um aumento de 22.678,26 km². Na APATX, a expansão foi ainda mais intensa: a Agropecuária representava apenas 0,92% da cobertura em 1996, chegou a 45,27% em 2023. Esse dado é particularmente alarmante, pois demonstra que o interior da unidade de conservação foi fortemente ocupado por Agropecuária, constituindo-se no principal vetor de transformação da paisagem regional.

As Áreas Urbanas e de Mineração, embora com participação proporcionalmente menor, também apresentaram crescimento. As Áreas Urbanas passaram de 103,52 km² (0,11%) em 1996 para 222,99 km² (0,23%) em 2023 na área total. Na APATX, essa classe aparece apenas a partir de 2023, representando 0,05% da área da APATX. A Mineração também cresceu: de 110,71 km² (0,12%) para 444,05 km² (0,47%) na região, e de 0,03% para 0,06% na APATX. Ainda que seus valores absolutos sejam menores, ambas as classes indicam processos de ocupação que podem se intensificar nos próximos anos, caso não haja controle e monitoramento adequados.

A classe Corpos d'Água manteve-se relativamente estável em todo o período analisado, com valores de 0,64% na área total e entre 0,16% e 0,19% dentro da APATX. Embora isso indique baixa pressão direta sobre os recursos hídricos, não se descartam impactos indiretos decorrentes do avanço da Agropecuária e da perda de Vegetação Natural. Esses dados reforçam a importância da modelagem preditiva empregada neste trabalho, já que os padrões observados entre 1996 e 2023 indicam tendências consistentes de avanço da Agropecuária e retração da Vegetação Natural.

4.3. Modelagem 2023

Analizando o gráfico de ganhos e perdas da área de estudo entre os anos 2006 e 2016, constatou-se um expressivo aumento da classe Agropecuária e uma redução significativa da classe Vegetação Natural neste período (Figura 6), o que está de acordo com a análise temporal da área observado na seção 4.2. Os ganhos na classe Vegetação Natural foram muito inferiores a perda de área, ficando num balanço negativo (-3.478,54 km²), já a Agropecuária teve retrações inferiores à sua expansão.

A perda de área da Agropecuária pode estar relacionada a dinâmica do uso de terra nessa atividade, em que, após alguns anos de uso intensivo, ocorre o esgotamento dos recursos necessários para manutenção da atividade, gerando a necessidade de novas área para subsidiar a atividade. Ou, ainda, a implementação de alguma medida ambiental de recuperação de área degradada. Com base nesses resultados gerou-se o mapa de tendência espacial de mudanças entre todas as transições possíveis para a Agropecuária.

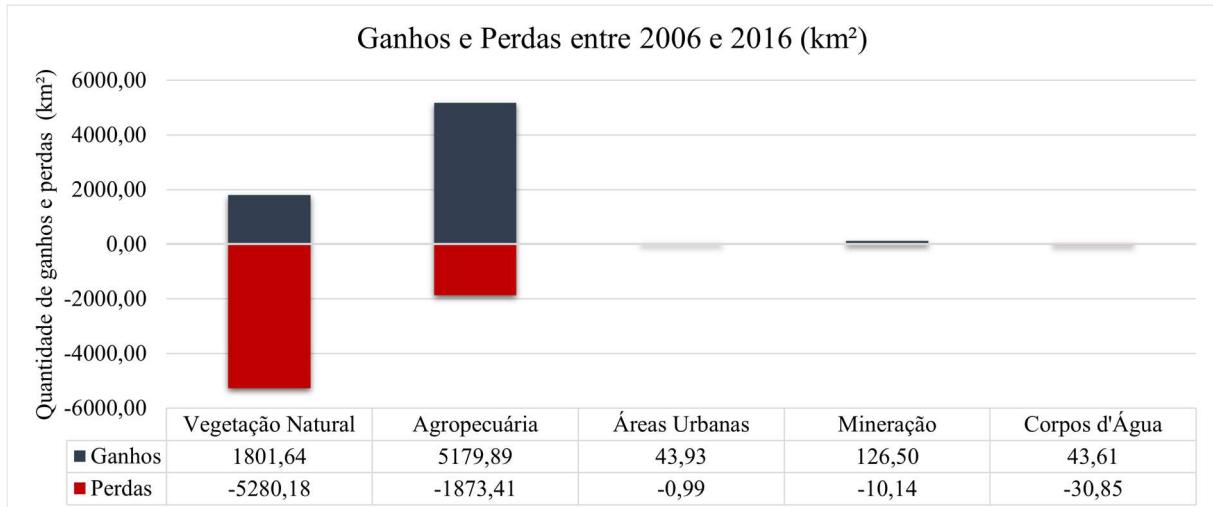


Figura 6. Gráfico de ganhos e perdas em km² das classes na área de estudo entre os anos 2006 e 2016.

A tendência espacial de mudanças, representada na Figura 7, obtida a partir da análise no módulo *Change Analysis* do LCM, utilizando o polinômio de grau 6, revela que a maior parte das transições na área de estudo tende a ocorrer na região leste e nordeste da APATX. Observa-se ainda, que ao aplicar a análise de tendência com foco nas transições da classe Vegetação Natural para todas as demais classes, a direção da tendência espacial permanece, reforçando o padrão de avanço antrópico a leste e nordeste da unidade de conservação (mapa C da Figura 7).

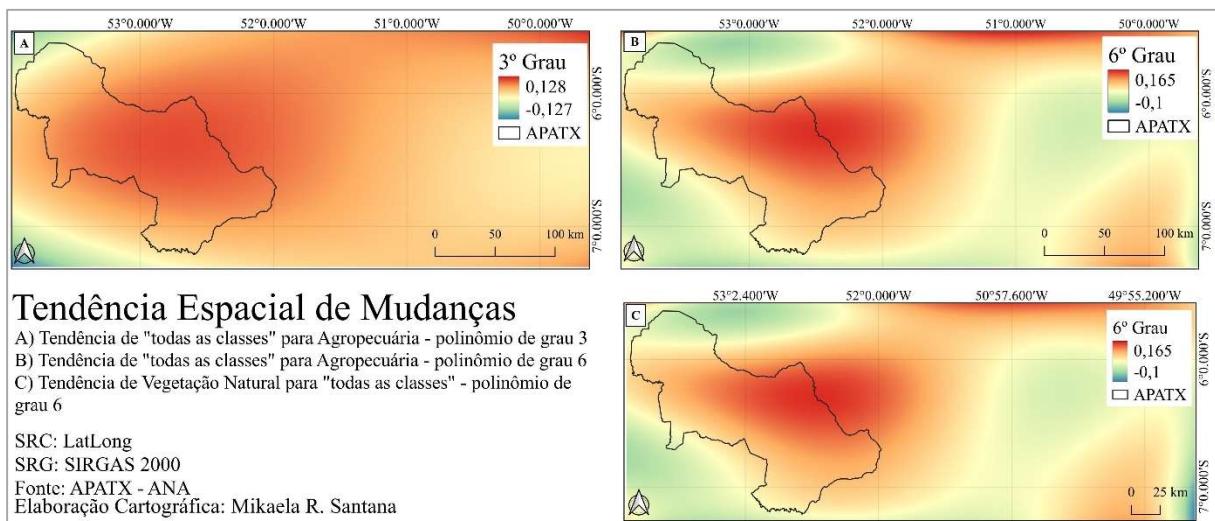


Figura 7. Mapa da tendência espacial de mudanças em diferentes graus de polinômios: A) polinômio de grau 3; B) polinômio de grau 6; C) tendência de vegetação natural para todas as classes em grau 6.

As oito variáveis explicativas adicionadas ao modelo na primeira tentativa, apresentaram as seguintes ER, da maior para a menor: distância de agropecuária (0,5817), distância de rodovias (0,2815), distância de cursos d'água (0,1243), MDE (0,1224), distância de mineração (0,1199), distância de áreas urbanas (0,1125), declividade (0,0463) e probabilidade de mudança (0,0134). Esses resultados indicam que as variáveis com maior poder explicativo para a conversão do uso da terra para Agropecuária foram aquelas relacionadas à proximidade com áreas já anteriormente ocupadas com essa finalidade, especialmente a própria agropecuária e as rodovias. Quanto mais próximas essas feições estão, maiores as chances de

uma área ser convertida para uso agropecuário. Os mapas correspondentes a cada uma das variáveis testadas estão disponíveis do Apêndice A ao Apêndice J.

Por outro lado, as variáveis de menor contribuição no processo, neste caso específico, foram a declividade e a probabilidade de mudança. Segundo Ramos, Azevedo e Galvanin (2024), áreas situadas entre 250 e 1000 metros de altitude tendem a favorecer o desmatamento. Considerando que toda a região de estudo está abaixo de 1000 metros, a variável relacionada à altitude se apresenta como relativamente homogênea, o que reduz seu poder de discriminação espacial e explica o baixo ER atribuído ao MDE e à declividade. Apesar dos baixos valores encontrados nas variáveis declividade e probabilidade de mudanças essas foram mantidas no modelo, pois nos testes em que foi feita a modelagem sem essas variáveis houve uma queda na acurácia ficando abaixo de 75%.

A melhor precisão alcançada no treinamento para o período de 2006 a 2016 foi de 81,93%, considerando todas as variáveis como estáticas. Folharini e Oliveira (2020) obtiveram valor semelhante de acurácia (84,43%). Esses autores explicam que esse valor representa a exatidão na classificação durante o processo de calibração, indicando a quanto próxima a classificação está do valor real do pixel, ou seja, durante a calibração, é realizada uma validação interna do modelo, utilizando os dados previamente divididos para teste e treinamento.

A matriz de transição de Markov gerada para esse período é apresentada na Tabela 3. A diagonal em destaque indica alta permanência das classes no mesmo uso (ex.: Áreas Urbanas e Mineração). Os valores fora da diagonal representam transições entre classes, como a conversão de Vegetação Natural em Agropecuária. Na Tabela 3 verifica-se que a transição da classe Vegetação Natural para Agropecuária (5,49%) se mostra como a principal transição, apontando para pressão antrópica contínua sobre áreas vegetadas. A transição entre as classes Agropecuária e Vegetação Natural (4,69%) apontam para uma reversão ou regeneração em parte das áreas anteriormente desmatadas. Já a transição entre Mineração e Corpos d'Água (3,84%) pode indicar impactos ambientais da mineração sobre áreas aquáticas ou erros de classificação.

Tabela 3. Matriz de Probabilidade de mudanças (2023) – Cadeia de Markov

| De/Para | Vegetação Natural | Agropecuária | Áreas Urbanas | Mineração | Corpos d'Água |
|--------------------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Vegetação Natural | 0,9440 | 0,0549 | 0,0000 | 0,0008 | 0,0003 |
| Agropecuária | 0,0469 | 0,9506 | 0,0011 | 0,0012 | 0,0002 |
| Áreas Urbanas | 0,0003 | 0,0006 | 0,9940 | 0,0049 | 0,0002 |
| Mineração | 0,0098 | 0,0046 | 0,0005 | 0,9468 | 0,0384 |
| Corpos d'Água | 0,0259 | 0,0033 | 0,0001 | 0,0072 | 0,9635 |

4.4. Validação

A predição do ano de 2023 em comparação com o mapa de referência do MapBiomas é apresentado na Figura 8. Nela, é possível observar que a simulação gerada pelo modelo se mostrou conservadora, ao restringir a expansão da classe Agropecuária dentro da APATX, em sua maior parte, às áreas próximas às rodovias e as áreas anteriormente classificadas como Agropecuária. No entanto, ao comparar com a referência representada no mapa de 2023 do

MapBiomass, nota-se que a expansão agropecuária ocorreu de forma mais ampla, alcançando regiões afastadas e sem acesso por estradas conhecidas.

Esse resultado indica uma subestimação do avanço da conversão de uso do solo pelo modelo, possivelmente devido à forte dependência das variáveis explicativas relacionadas à acessibilidade, como a distância de rodovias, o que pode ter limitado a representação de frentes de desmatamento em áreas mais isoladas. De maneira similar, os resultados obtidos no estudo de Deus (2013), em relação as áreas em que houve maiores ocorrências de erros na predição, também foram concentrados nas regiões desmatadas que ocorreram longe da malha rodoviária disponível.



Figura 8. Mapa predito de 2023 e mapa de referência de 2023.

Na Tabela 4 é apresentado as áreas de cada classe com relação aos mapas de referência e o predito de 2023. Observa-se que a única classe superestimada no mapa predito foi a classe de Vegetação Natural em 5,59%. Já as classes mais subestimadas foram as classes Mineração (43,38%), Áreas Urbanas (29,38%) e Agropecuária (7,98%). A classe Corpos d'Água também teve uma subestimação da sua área em 0,56%. A Figura 9 mostra a ampliação das classes que tiveram maior omissão na predição de 2023 comparado ao mapa de referência.

Tabela 4. Comparação entre o mapa de referência e o mapa predito (2023) em relação as áreas de cada classe em km² e seu erro em porcentagem.

| Classes | Área em km ² | | |
|--------------------------|-------------------------|-------------|---------|
| | Mapa de Referência | Mapa Predit | Erro % |
| Vegetação Natural | 57.236,427 | 60.438,2985 | + 05,59 |
| Agropecuária | 36.867,8997 | 33.927,6168 | - 07,98 |
| Áreas Urbanas | 222,9858 | 157,4703 | - 29,38 |
| Mineração | 444,0474 | 251,4276 | - 43,38 |
| Corpos d'Água | 613,9755 | 610,5123 | - 00,56 |

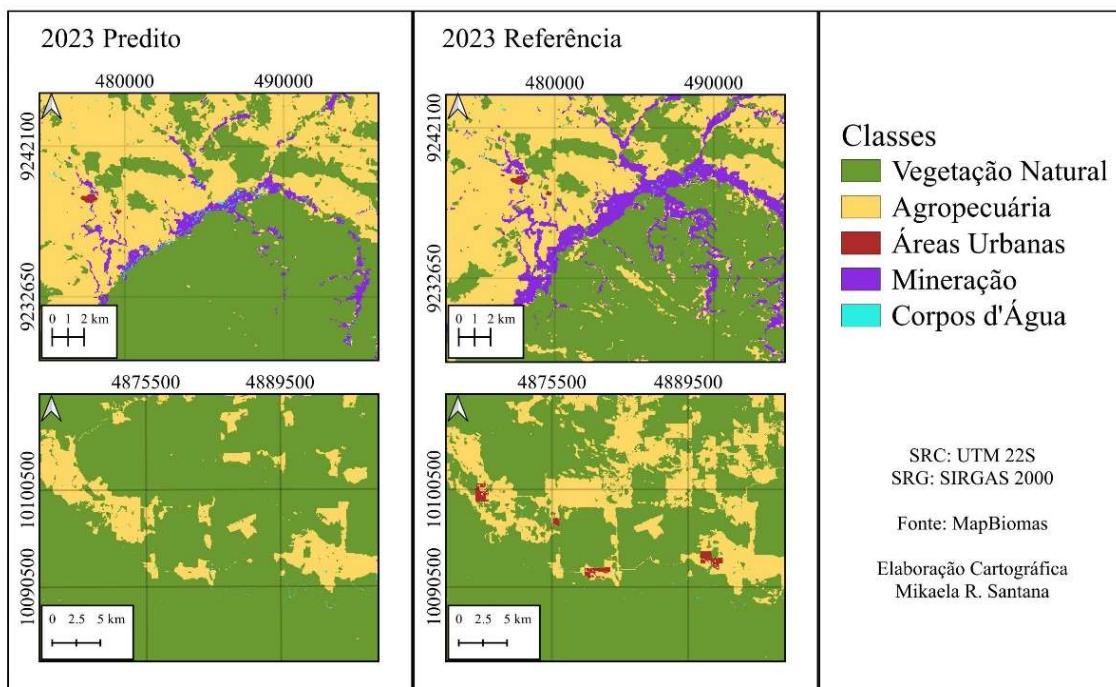


Figura 9. Comparação das classes mais omitidas na predição de 2023 comparada ao mapa de referência.

Embora tenham sido utilizadas fontes oficiais reconhecidas, como as bases cartográficas do IBGE, é possível que a região de estudo contenha uma malha viária incompleta ou desatualizada, especialmente no que se refere a estradas vicinais, não pavimentadas ou abertas de forma informal, que ainda não foram devidamente mapeadas. A ausência dessas infraestruturas nos dados de entrada pode ter influenciado a calibração do modelo, reduzindo a sensibilidade às reais dinâmicas de ocupação territorial, sobretudo em áreas sujeitas à expansão agropecuária e à abertura de novos acessos. Assim, a limitação na representação espacial da acessibilidade pode ter contribuído para uma estimativa mais conservadora do processo de transformação da paisagem.

Engert *et al.* (2024) destacam que vias não mapeadas (as “ghost roads”) geralmente antecedem o desmatamento, especialmente em áreas remotas. Os autores avaliaram como a expansão acelerada e, muitas vezes invisível, de “estradas fantasmas” representa uma das ameaças mais graves às florestas tropicais, sendo fortemente associada à perda e fragmentação florestal, com impacto especialmente significativo em regiões biodiversas do sudeste asiático, onde a densidade de estradas é o principal fator correlacionado ao desmatamento. Deus (2013) salienta que é esperado que o mapa rígido, que determina os locais exatos de mudanças, não

tenha uma acurácia em relação as transições esperadas muito elevada, visto que ele é a representação de um cenário dentre vários possíveis. O mapa de validação gerado no LCM, com a discriminação dos acertos, erros e falsos alarmes, é apresentado na Figura 10.

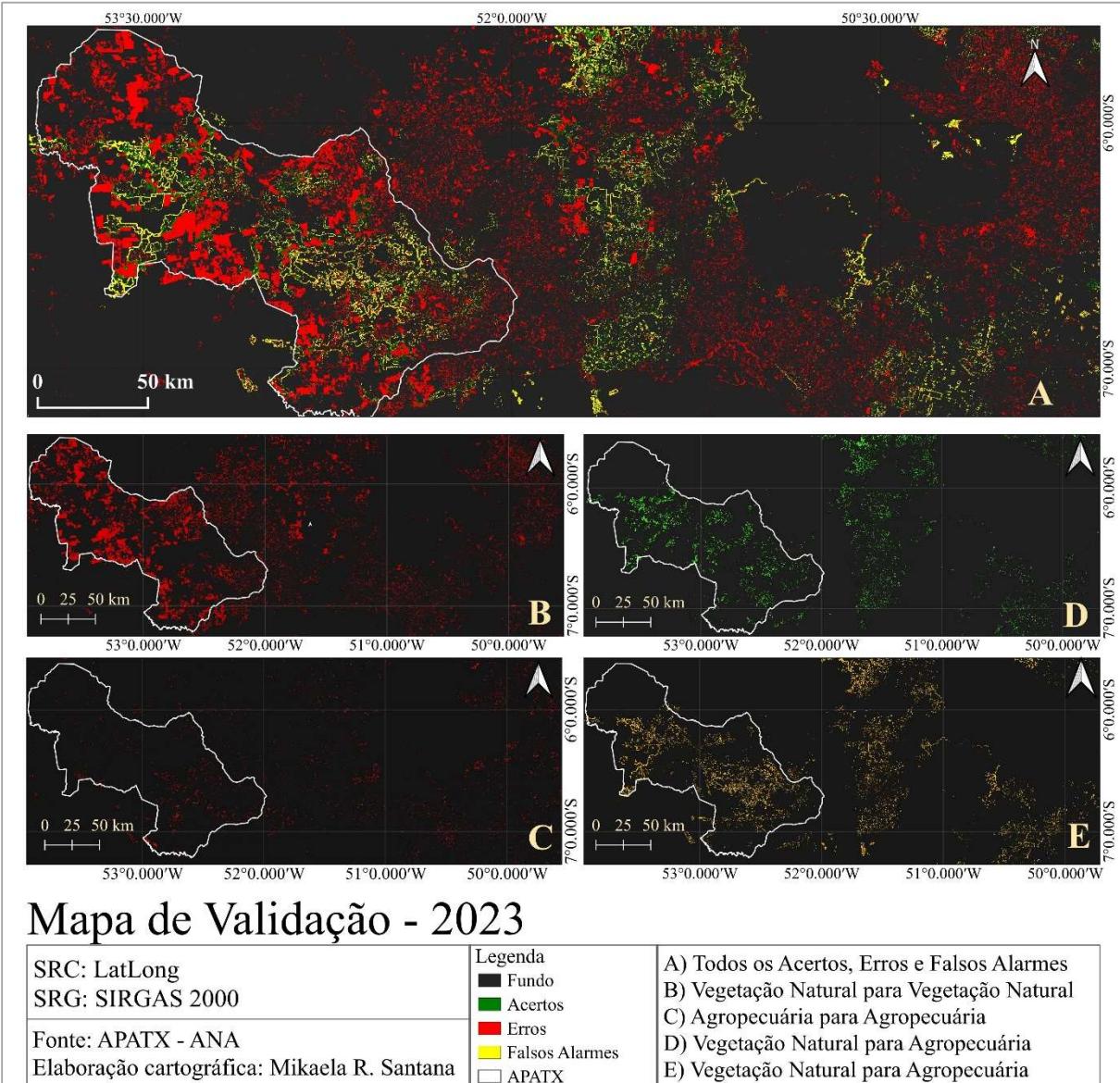


Figura 10. Mapa da validação das transições do modelo de 2023. A) Todos os acertos, erros e falsos alarmes. Principais erros, falsos alarmes e acertos: B) Vegetação Natural para Vegetação Natural; C) Agropecuária para Agropecuária; D) Vegetação Natural para Agropecuária; E) Vegetação Natural para Agropecuária.

A Figura 11 apresenta a distribuição percentual dos acertos, erros e falsos alarmes das transições do mapa predito para 2023. O modelo obteve 11,54% de acertos nas variações previstas para o ano de 2023, sendo que 100% desses acertos correspondem à correta identificação de áreas de Vegetação Natural que foram convertidas para Agropecuária. Por outro lado, os erros totalizaram 67,49%, dos quais 89,35% estão associados à não detecção de áreas efetivamente convertidas Vegetação Natural para Agropecuária entre 2016 e 2023, que foram incorretamente classificadas como permanecendo como Vegetação Natural. Em relação aos falsos alarmes, a maioria (98,81%) refere-se à atribuição indevida da classe Agropecuária a áreas que, na realidade, permaneceram como Vegetação Natural. Na validação do mapa

predito no estudo de Pavão (2017) seguiu-se este mesmo padrão, em que a maior parte (59,69%) foi de erros, seguido de falsos alarmes (37,44) e em menor porcentagem os acertos (2,87%).

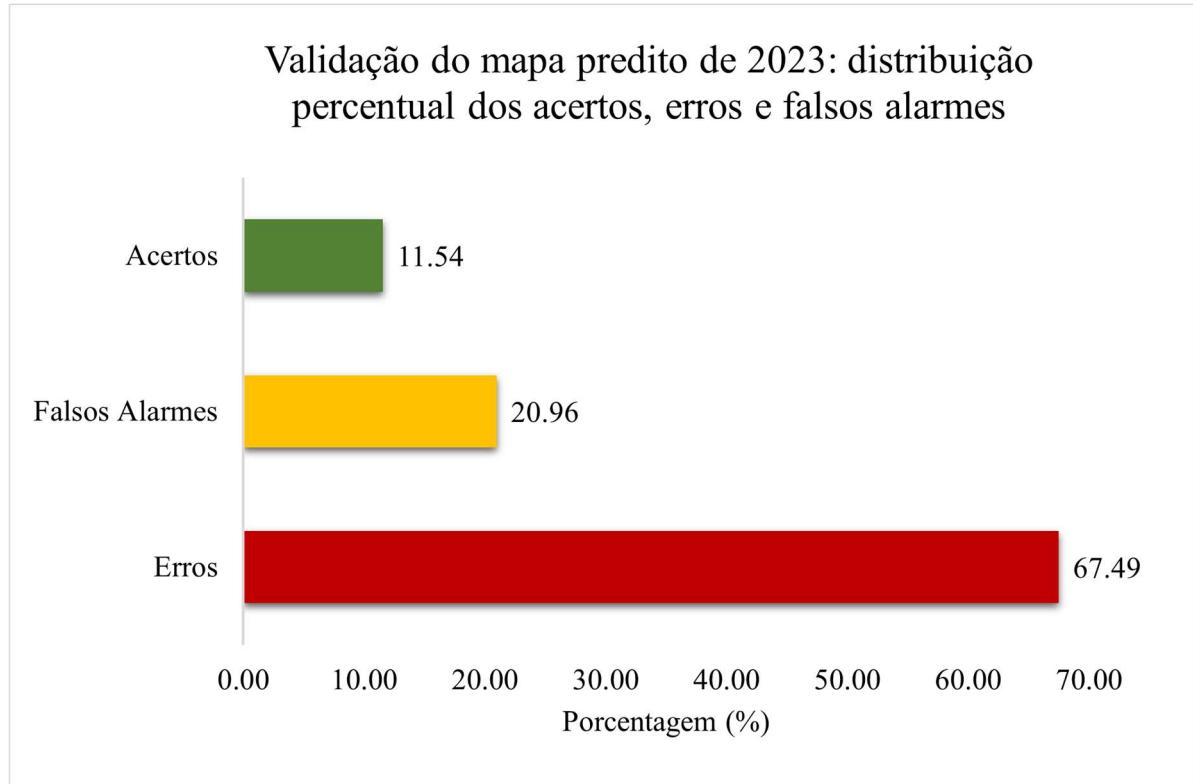


Figura 11. Distribuição percentual dos acertos, erros e falsos alarmes do mapa predito de 2023.

A maior parte do mapa de validação (Figura 11) está sem a simbologia de acertos (verde), erros (vermelho) ou falsos alarmes (amarelo). Isto ocorre devido a esta validação ser em relação as transições, seja transições que foram previstas que ocorreriam e não ocorreram – falsos alarmes, transições que foram previstas que ocorreriam e de fato ocorreram – acertos, ou transições que não foram previstas que ocorreriam (permanência de classes), mas que ocorreram – erros. Logo, as áreas em preto no mapa A da Figura 10 representam permanências que o modelo previu e ocorreu, no entanto, este “acerto” não entra na validação do módulo LCM por não representar uma transição.

Em vista disso, para que se tenha uma análise mais criteriosa do mapa previsto, também foram gerados a partir da ferramenta *Validate*, índices que expressam o nível de concordância entre os mapas e os valores de KIA, os quais podem ser observados na Figura 12. O valor de Kappa padrão (Kstandard) foi de aproximadamente 80%, mostrando que a existe uma alta concordância entre o mapa predito e o mapa de referência. O modelo teve Kno de 0,88 e Klocation de 0,85, representando um ótimo desempenho na previsão de quantidades e na sua espacialização. O gráfico da Figura 12 mostra que a proporção de pixels que coincidem exatamente é de 39,04%, indicando localização precisa dos pixels, a concordância da quantidade de classes foi de 34,35%, a concordância esperada ao acaso é de somente 16,67%. Os erros em quantidade e em localização, foram de, respectivamente, 3,33% e 6,61%.

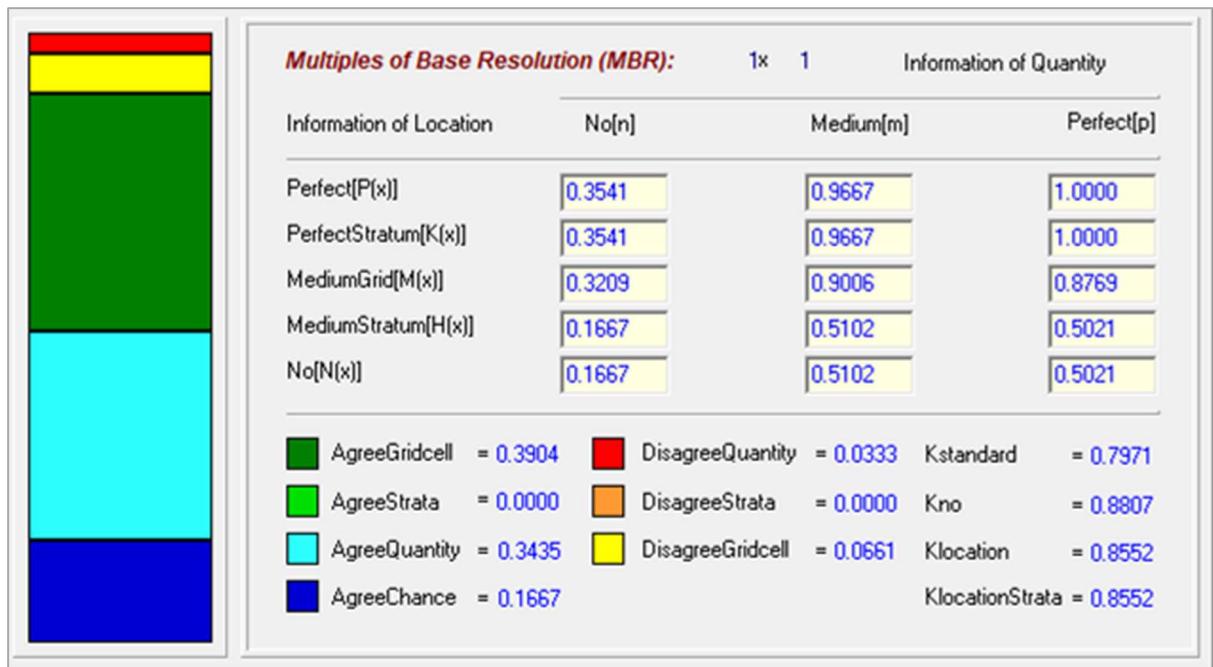


Figura 12. Gráfico de saída do módulo *Validate*.

A avaliação da calibração, precisão e validação da modelagem tem grande relevância, em primeiro lugar, por meio deles é possível fazer uma análise mais coerente da qualidade da modelagem. Em segundo lugar, a disponibilização desses resultados contribui para que outros estudos possam fazer comparações das suas análises e difundir o conhecimento sobre os modelos preditivos. Apesar dessa importância Vliet *et al.* (2016), afirmam que nas 51 aplicações em que foram compiladas 98 publicações sobre o tema da modelagem, apenas 31% informam sobre os resultados da validação. O estudo em questão analisou artigos que utilizaram diferentes modelos preditivos de mudança do uso da terra.

4.5. Modelagem 2033

A calibração do modelo com melhor desempenho para o período de 2016 a 2023 obteve uma acurácia de 77,24%, utilizando-se as oito variáveis explicativas, com um total de 10 mil amostras divididas igualmente entre teste (50%) e treinamento (50%). Os valores do Erro Quadrático Médio (RMS) foram de 0,3962 para o teste e 0,4025 para o treinamento, indicando coerência entre os desempenhos de aprendizado e validação. Apesar da ampliação da área de estudo para além dos limites da APATX, o modelo indicou que a região oeste e noroeste da APATX concentra a maior probabilidade de alteração da cobertura da terra, conforme evidenciado na Figura 13. As grandes áreas de Vegetação Natural visíveis nessa figura coincidem, em sua maioria, com áreas de unidades de conservação e terras indígenas (Apêndice K).

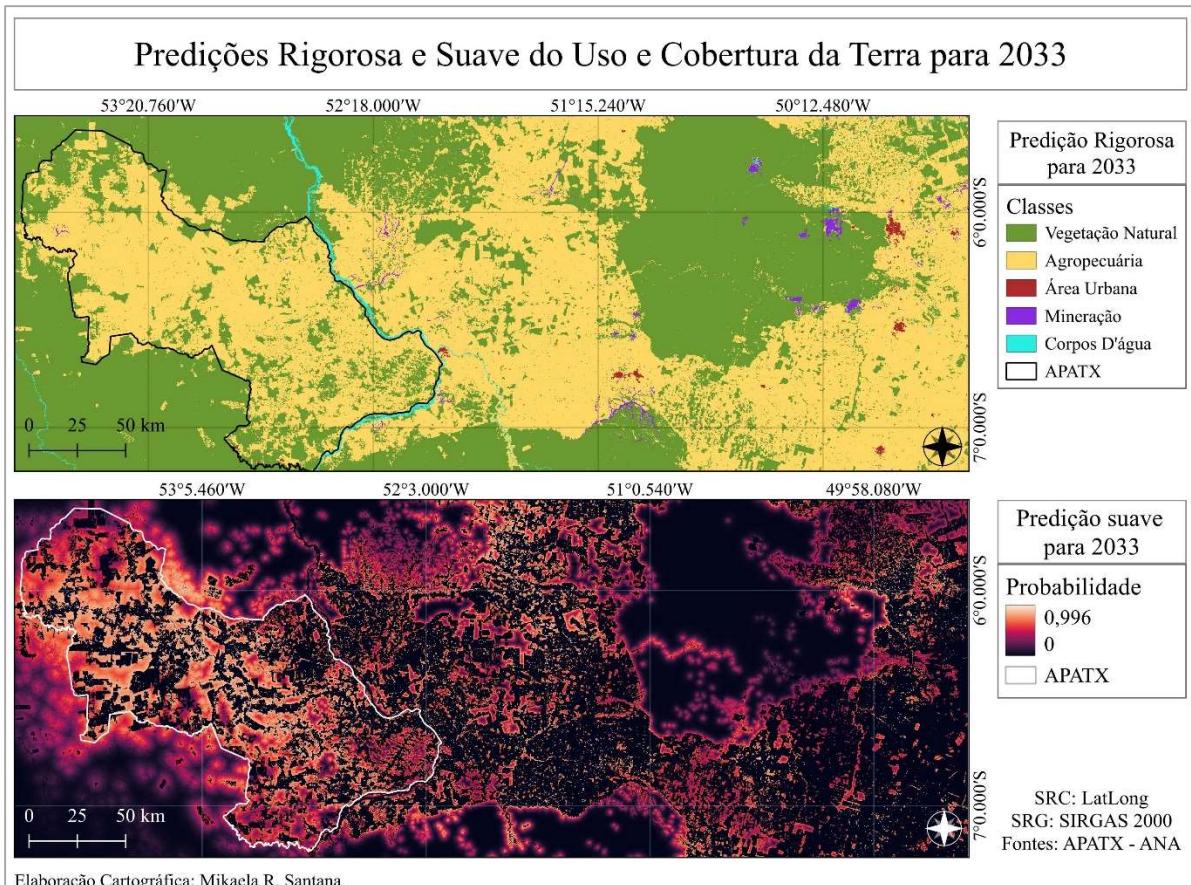


Figura 13. Predições rigorosa e suave do uso e cobertura da terra para 2033.

A matriz de transição de Markov é apresentada na Tabela 5 e mostra que as classes mais estáveis, ou seja, com maior probabilidade de permanecerem inalteradas, são Mineração (0,9842), indicando pouca transformação para outros usos, Áreas Urbanas (0,9755) com alta estabilidade, comum em áreas urbanizadas e Agropecuária (0,9566) também bastante estável, sugerindo consolidação do uso do solo. A classes Vegetação Natural apresenta a menor estabilidade relativa (0,8369), com 15,96% de chance de se converter em Agropecuária, o que aponta para forte pressão antrópica.

Corpos d'Água têm 13,16% de chance de se converter em outras classes, com destaque para Mineração (6,25%), esse valor é particularmente preocupante, sugerindo ocupação ou alteração de áreas aquáticas por atividades extrativas. A matriz revela um padrão claro de pressão sobre a Vegetação Natural, evidenciando a necessidade de políticas de conservação e fiscalização. A Agropecuária mantém-se dominante e estável, o que pode representar práticas consolidadas de ocupação do solo. A possibilidade de conversão de Corpos d'Água em áreas de Mineração acende um alerta ambiental relevante para a região.

Tabela 5. Matriz de Probabilidade de mudanças (2033) – Cadeia de Markov

| De/Para | Vegetação Natural | Agropecuária | Áreas Urbanas | Mineração | Corpos d'Água |
|--------------------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Vegetação Natural | 0,8369 | 0,1596 | 0,0002 | 0,0022 | 0,0011 |
| Agropecuária | 0,0368 | 0,9566 | 0,0028 | 0,0033 | 0,0004 |
| Áreas Urbanas | 0,0003 | 0,0058 | 0,9755 | 0,0181 | 0,0004 |
| Mineração | 0,0033 | 0,0070 | 0,0008 | 0,9842 | 0,0047 |
| Corpos d'Água | 0,0545 | 0,0140 | 0,0006 | 0,0625 | 0,8684 |

A Tabela 5 revela que cerca de 3,68% da área classificada como Agropecuária será revertida para Vegetação Natural, indicando uma baixa taxa de recuperação. A predição rigorosa (Figura 13) aponta para uma diminuição da cobertura de Vegetação Natural para 50,43% da área total em 2033, enquanto a Agropecuária atingirá 48,23%, sugerindo que, caso a tendência atual se mantenha, quase metade da área de estudo estará ocupada por pastagens no horizonte projetado.

A predição suave, que mostra a probabilidade de cada pixel de sofrer mudanças de classe de 2023 para 2033 também é apresentado na Figura 13. Nela é possível notar que não somente a APATX tem potencial de conversão de terras, mas também as regiões que durante os anos dessa análise (1996 a 2023) se mantiveram como Vegetação Natural, mas pela pressão sofrida em seus perímetros também têm grandes chances de sofrerem mudanças em 2033.

Considerando um recorte espacial baseado nos limites da APATX, a predição rigorosa para o ano de 2033 indica uma redução aproximada de 72,69% na área de Vegetação Natural, em comparação ao ano de referência inicial (1996) e de 68,12% em relação a 2006, ano de criação da UC. Essa perda significativa reflete uma conversão majoritária para a classe Agropecuária, que apresentou um crescimento expressivo: de 155,14 km² em 1996 para 12.209,81 km² em 2033, o que corresponde a um aumento de 7.770% ao longo de 37 anos. Se comparado com o ano de criação da UC esse aumento relativo é de aproximadamente 380,70%.

O dado mais alarmante revelado por essa projeção é que, nesse cenário, a Agropecuária ultrapassará a Vegetação Natural em extensão dentro da unidade de conservação, caso nenhuma medida efetiva de controle e gestão territorial seja implementada. Esse resultado coloca em xeque a efetividade da APATX como unidade de conservação, evidenciando a urgência de políticas públicas mais rigorosas e ações de monitoramento contínuo.

Apesar da relevância do uso da modelagem para se antecipar possíveis tendências na mudança do uso da terra, vale ressaltar que os modelos rígidos não são definitivos (Deus, 2013), mas servem de apoio na tomada de medidas para o ordenamento territorial. Como foi demonstrado na pesquisa, a área do estudo há décadas tem tido o uso e cobertura da terra modificado para agropecuária e a previsão para 2033 apontando para um crescimento neste sentido é condizente com a análise multitemporal da área. Com isso, a partir dos resultados previstos para 2033 das áreas mais propensas a mudarem de Vegetação Natural para Agropecuária, pode-se tomar medidas que visem uma proteção mais efetiva sobretudo para a APA. Pois, apesar de ser uma UC de uso sustentável as atividades realizadas no seu interior devem ocorrer de forma ordenada a fim de manter e recuperar a biodiversidade local.

Para trabalhos futuros sobre a dinâmica do uso e cobertura terra na APATX, sugere-se a utilização de imagens de satélite de alta resolução espacial para facilitar não apenas a identificação das classes de cobertura vegetal, mas também a identificação do uso da terra na região de estudo. Além de ser interessante incluir outras variáveis explicativas que possam afetar essa dinâmica, como o crescimento populacional futuro, a construção de empreendimentos com grande impacto na paisagem tais como novas rodovias, entre outros.

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho demonstram que a APATX tem sofrido intensa pressão antrópica ao longo dos anos, com elevados índices de desmatamento, especialmente nas bordas e proximidades de áreas já antropizadas. A modelagem espacial desenvolvida por

meio da plataforma LCM permitiu identificar os principais vetores de mudança no uso e cobertura da terra e simular um cenário futuro de desmatamento para o ano de 2033.

A calibração do modelo resultou em uma simulação coerente, apesar de conservadora, com os padrões espaciais de transformação observados, evidenciando o avanço do desmatamento em direção ao interior da unidade de conservação. A análise dos fatores condicionantes e das transições mais relevantes indica que a expansão da agropecuária e a proximidade de vias são elementos centrais na persistência da degradação ambiental na região.

A tendência de conversão de uso da terra é mais expressiva nas regiões oeste e noroeste da APATX. A perda da Vegetação Natural, para 2033 dentro da APATX, configura um cenário alarmante. Com base nos resultados encontrados pode-se concluir que a pressão exercida pela agropecuária sobre a unidade de conservação tem se intensificado a cada período analisado, evidenciando a necessidade de medidas eficazes para assegurar a real efetividade da APATX enquanto área protegida.

De modo geral, o presente trabalho demonstra que a APATX tem sofrido pressões antrópicas significativas, especialmente relacionadas à expansão da agropecuária que tende a avançar sobre o seu território. Os cenários produzidos possibilitam a identificação de ameaças e de oportunidades de recuperação ambiental, e os resultados obtidos se mostram coerentes com a realidade observada. Portanto, a aplicação de ferramentas de modelagem espacial, como o LCM, mostra-se eficiente para subsidiar o planejamento ambiental e a tomada de decisões, oferecendo uma base técnico-científica para ações preventivas e mitigadoras do desmatamento.

Dessa forma, este estudo contribui para o entendimento da dinâmica espacial das mudanças no uso e cobertura da terra e destaca a importância de estratégias integradas de gestão territorial que considerem os aspectos socioambientais locais e os potenciais impactos futuros das atividades humanas sobre os ecossistemas amazônicos.

6. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. S.; LAMEIRA. W. J. M.; PEREIRA, J. G.; THALÊS, M. C.; SALES, G. M. Potencial de pressão antrópica na região Nordeste Paraense, Brasil. **Ciência Florestal**, v. 32, n. 1, 2022.

ALMEIDA, C. A.; PEREZ, L. P.; REIS, M. S.; CAMILOTTI, V. L.; MESSIAS, C. G.; MONTEIRO, E. C. S.; PINHEIRO, T. F.; PINTO, J. F. S. K. C.; SOLER L. S.; VINHAS, L.; MAURANO, L. E. P.; ADAMI, M.; KUPLICH, T. M.; NARVAES, I. S.; ARCOVERDE; G. F. B.; AMARAL, S. Monitoramento oficial da vegetação nativa brasileira por imagens de satélite: o programa biomassBR e os sistemas Prodes, Deter e TerraClass. **Cadernos de astronomia**, v. 6, n. 1, 2025.

BARROS, M. C. V. **Modelagem da dinâmica espacial do uso e ocupação do solo no município de Pitimbu – PB**. 2018. Monografia (Graduação) - UFPB/CT. João Pessoa, 2018.

BECKMAM, W. F.; BRAGA, G. S.; CAMPEROS-REYES, J. T.; CONDURÚ, M. T. Dados abertos sobre áreas de desmatamento no estado do Pará. **Reumam**, v. 9, n. 2, p. 60-70, 2024.

BORGES, S. H.; IWANAGA, S.; MOREIRA, M.; DURIGAN, C. C. Uma análise geopolítica do atual sistema de unidades de conservação na Amazônia Brasileira. **Política Ambiental**. n. 4, 2007.

BRASIL. (Ministério do Meio Ambiente). **SNUC – Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza**: Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000; Decreto nº 4.340, de 22 de agosto de 2002; Decreto nº 5.746, de 5 de abril de 2006. Plano Estratégico Nacional de Áreas Protegidas: Decreto nº 5.758, de 13 de abril de 2006. Brasília: MMA, 76 p., 2011.

BRASIL. Lei Nº. 9.985 de 18/07/2000. **Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC)**. Brasília (DF), Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis/ Diretoria de Ecossistemas, 2002.

CÂMARA, G.; DAVIS C.; MONTEIRO, A.M.; D'ALGE, J.C. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos, INPE, 2001 (on-line, 2a. edição, revista e ampliada).

CASTRO, E. R.; MONTEIRO, R.; CASTRO, C. P. Atores sociais na fronteira mais avançada do Pará: São Félix do Xingu e a Terra do Meio. **Papers do NAEA**, n. 180, 2004.

CLARK CGA. **História**. Clark Center for Geospatial Analytics, 2025. Disponível em: https://www.clarku.edu/centers/geospatial-analytics/uncategorized/terrset-advancing-geospatial-technology-for-sustainable-development/?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 7 maio de 2025.

CLARK CGA. **Novidades no TerrSet liberaGIS**. Clark Center for Geospatial Analytics, 2024a. Disponível em: <https://www.clarku.edu/centers/geospatial-analytics/uncategorized/whats-new-with-terrset-liberagis/>. Acesso em: 7 maio de 2025.

CLARK CGA. **TerrSet: Avanço da Tecnologia Geoespacial para o Desenvolvimento Sustentável**. Clark Center for Geospatial Analytics, 2024b. Disponível em: https://www.clarku.edu/centers/geospatial-analytics/uncategorized/terrset-advancing-geospatial-technology-for-sustainable-development/?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 7 maio de 2025.

CLARK CGA. **TerrSet Help System: Test and Selection of Site and Driver Variables - Land Change Modeler**. Clark Center for Geospatial Analytics, 2024c.

CLARK CGA. **TerrSet Help System: VALIDATE - Land Change Modeler**. Clark Center for Geospatial Analytics, 2024d.

COSTA, A. L. S. **Efetividade de gestão da área de proteção ambiental Triunfo do Xingu: desafios de consolidação de uma unidade de conservação na região da Terra do Meio, Estado do Pará**. 2013. Tese (Doutorado em Ciências do Desenvolvimento Socioambiental) - Universidade Federal do Pará, Núcleo de Altos Estudos Amazônicos, Belém. 2013.

COSTA, A. L. S.; REIS, L. R. A contribuição da APA Triunfo do Xingu para o ordenamento fundiário na região da Terra do Meio, estado do Pará. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 60, n. 1, p. 96-102, 2017.

DEUS, L. A. B. **Espaço e Tempo como Subsídios à Construção de Cenários de Uso e Cobertura da Terra para o Planejamento Ambiental da Amazônia: O caso da Bacia do Rio Acre**. 2013. Tese (Doutorado em Planejamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

EASTMAN, J. R. **IDRISI Andes Guide to GIS and Image Processing**. Clark Labs Clark University, 2006.

EASTMAN, J. R. **TerrSet liberaGis: Geospatial Monitoring and Modeling System - Manual**. Clark University, Clark Center for Geospatial Analytics, 2024a.

EASTMAN, J. R. **TerrSet liberaGis: Geospatial Monitoring and Modeling System - Tutorial.** Clark University, Clark Center for Geospatial Analytics, 2024b.

ENGERT, J. E.; CAMPBELL, M. J.; CINNER, J. E.; ISHIDA, Y.; SLOAN, S.; SUPRIATNA J.; ALAMGIR M.; CISLOWSKI, J.; LAURANCE, W. F. Publisher Correction: Ghost roads and the destruction of Asia-Pacific tropical forests. **Nature**, v. 629, n. 8014, p. 370-375, 2024.

ESCADA, M. I. S.; AMARAL, S.; FERNANDES, D. A. Dynamics of occupation and landscapes changes in the Amazon, Brazil. **Caderno de Saúde Pública**, v. 39, n. 3, 2023.

FAO. **Land Cover Classification System.** FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, Roma, 2016.

FERNANDES, M. M.; FERNANDES, M. R. M.; GARCIA, J. R.; MATRICARDI, E. A. T.; LIMA, A. H. S.; ARAÚJO FILHO, R. N.; GOMES FILHO, R. R.; PISCOYA, V. C.; PISCOYA, T. O. F.; CUNHA FILHO, M. Land use and land cover changes and carbon stock valuation in the São Francisco River basin, Brazil. **Environmental Challenges**, v. 5, 2021.

FOLHARINI, S.; OLIVEIRA, R. Utilização do Land Change Modeler® na modelação prospectiva do uso e cobertura do solo na microrregião de Santos, Brasil para o ano de 2022. **Revista Centro de estudos de Geografia e Ordenamento do Território (GOT)**, n. 19, p. 57-73, 2020.

GUDER, A. C.; KABETA, W. F. Evaluation of future land use change impacts on soil erosion for Holota watershed, Ethiopia. **Scientific Reports**, v. 15, p. 1-21, 2025.

GUIDOLINI, J. F.; ALMEIDA, A. M.; VALLE JÚNIOR, R. F.; SCHULER, A. E.; ARAÚJO, M. V. N. Modelagem da dinâmica do uso e ocupação do solo (1975 a 2010) na bacia do Rio Uberaba, município de Veríssimo – MG. In: **Congresso brasileiro de ciência do solo**, 34., 2013, Florianópolis, Anais [...]. Florianópolis, p. 1-4, 2013.

HASAN, S.; SHI, W.; ZHU, X.; ABBAS, S.; KHAN, H. U. A. Future Simulation of Land Use Changes in Rapidly Urbanizing South China Based on Land Change Modeler and Remote Sensing Data. **Sustainability**, v. 12, 2020.

IBGE. **Brasil em síntese.** 2025. Disponível em: <https://brasilemsintese.ibge.gov.br/territorio.html>.

IBGE. **Macrocaracterização dos recursos naturais do Brasil:** Províncias estruturais, compartimentos de relevo, tipos de solos, regiões fitoecológicas e outras áreas. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/estudos-ambientais/24252-macrocaracterizacao-dos-recursos-naturais-do-brasil.html?edicao=24253&t=acesso-ao-produto>. Acesso em: jun. 2025.

IBGE. **Mapa de Biomas do Brasil, 2004.** Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/estudos_ambientais/biomas/mapas/biomas_5000mil.pdf. Acesso em: 28 abr. 2025.

IBGE; ANA. **Mapa das divisões hidrográficas do Brasil 2021 (DHN250):** macrorregiões, mesorregiões e microrregiões hidrográficas. Escala 1:250 000. Rio de Janeiro: IBGE; ANA, 2021. Mapa digital (PDF, 1 mapa). Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/estudos_ambientais/bacias_e_divisoes_hidrograficas_do_brasil/2021/Divisao_Hidrografica_Nacional_DHN250/mapas/mapa_das_divisoes_hidrograficas_do_brasil_2021.pdf. Acesso em: 18 jun. 2025.

IMAZON. **Fatos da Amazônia: meio ambiente e uso do solo.** Imazon. 2021.

IMAZON. **Unidades de conservação mais desmatadas da Amazônia legal (2012-2015).** Belém (PA), Imazon, 2017.

INPE. **Projeto de Monitoramento do Desflorestamento da Amazônia Legal por Satélite (PRODES).** 2025. Disponível em: <https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/dashboard/deforestation/biomes/amazon/increments>. Acesso em: 28 abr. 2025.

KAWASHIMA, R. S.; GIANNOTTI, M. A.; ALMEIDA, C. M.; QUINTANILHA, J. A. Modelagem dinâmica espacial como ferramenta para simulação de cenários da paisagem na região portuária da baixada santista. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 22, n. 4, p.703-718, 2016.

KUMAR, R.; NANDY, S. AGARWAL, R.; KUSHWAHA, S. P. S. Forest cover dynamics analysis and prediction modeling using logistic regression model. **Ecological Indicators**, v. 45, p. 444-455, 2014.

LEITE, E. F; ROSA, R. Análise do uso, ocupação e cobertura da terra na bacia hidrográfica do Rio Formiga, Tocantins. **Observatorium: Revista Eletrônica de Geografia**, v.4, n.12, p. 90-106, dez. 2012.

LEMOS, A. L. F.; SILVA, J. A. Desmatamento na Amazônia Legal: Evolução, Causas, Monitoramento e Possibilidades de Mitigação Através do Fundo Amazônia. **FLORAM**, v.18, n.1, p. 98-108, 2011.

MAPBIOMAS. **Desmatamento caiu em todos os biomas brasileiros em 2024.** 2024a. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/2025/05/15/mapbiomas-desmatamento-caiu-em-todos-os-biomas-brasileiros-em-2024/>. Acesso em: 24 jun. 2025.

MAPBIOMAS. **MapBiomas General “Handbook”: Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD).** Collection 9. Version 2. 2024b.

MAPBIOMAS. **O projeto.** 2025a. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/o-projeto/>. Acesso em: 28 abr. 2025.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomas – Coleção 9 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil:** legenda e descrição das classes. [s.l.]: MapBiomas, 2025b. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/4/2024/08/Legenda-Colecao-9-Descricao-Detalhada-PDF-PT.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2025.

MARTORANO, L. G. PEREIRA, L. C. CESAR, E. G. M. PEREIRA, I. C. B. **Estudos climáticos do estado do Pará: classificação climática (Köppen) e deficiência hídrica (Thornthwaite, Mather).** Belém: SUDAM; EMBRAPA-SNLCS, 49 p., 1993.

MISHRA, V. N.; RAI, P. K.; MOHAN, K. Prediction of land use changes based on land change modeler (lcm) using remote sensing: a case study of Muzaffarpur (Bihar), India. **Journal of the Geographical Institute “Jovan Cvijić” SASA**, v. 64, n. 1, p. 111-127, 2014.

MÜNCH, Z. **Towards land change management using ecosystem dynamics and land cover change in rural Eastern Cape.** 2019. Tese (Doutorado em Geoinformática) – Stellenbosch University, Faculty of Science, Department of Geography and Environmental Studies, Stellenbosch, 2019.

NEVES, A. K.; KÖRTING, T. S.; FONSECA, L. M. G.; ESCADA, M. I. S. Assessment of TerraClass and MapBiomass data on legend and map agreement for the Brazilian Amazon biome. **Acta Amazônica**, v. 50, n. 2, 2020.

PAVÃO, M. **Modelagem e análise de mudanças do uso e cobertura da terra no entorno de áreas protegidas: o caso do Parque Estadual da Cantareira – São Paulo.** 2017. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

PEREIRA, F. S.; FERNANDES, D. A.; VIEIRA, I. C. G. Impacts of Land Use and Land Cover Change on Ecosystem Service Values in the Eastern Amazon. **Ambiente & Sociedade**, v. 27, 2024.

PONTE, F. C.; SZLAFSZTEIN, C. F. Indicadores antropogênicos e cartografiação de eventos socioespaciais: subsídio à retrospectiva humana na Amazônia brasileira. **GEOUSP**, v. 26, 2022.

RAMOS, A. W. P.; AZEVEDO, U. R.; GALVANIN, E. A. S. Modelagem preditiva de desmatamento na bacia do alto Paraguai no estado de Mato Grosso, Brasil. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 25, n. 101, p. 112–130, 2024.

REIS, M. S.; ASSIS, T. O.; CAIRO, C. T.; MESSIAS, C. G.; BASTOS, E. F. M.; GUSMÃO, L. H. A.; ALMEIDA, R.; RODRIGUES NETO, M. R.; MORAES, D. R. V.; MOREIRA, N. A. P.; SILVA, I. S.; SOLER, L. S.; NACCARATO, K. P.; ALMEIDA, C. A. O monitoramento de uso e cobertura da terra nos biomas brasileiros e o gaia em jogo: uma proposta de popularização de ciência e tecnologia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. Florianópolis, 2023. **Anais** [...]. 2023.

ROSA, M.; SHIMBO, J. Z. S.; AZEVEDO, T. MapBiomass - Mapeando as transformações do território brasileiro nas últimas três décadas. In: SIMPÓSIO DE RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA. **Anais** [...]. São Paulo, 2019.

RYLANDS A. B; BRANDON K. Unidades de conservação brasileiras. **Megadiversidade**, v. 1, n. 1, 2005.

SILVA, I. C.; RODRIGUEZ, N. L. Formação territorial, economia e projetos de integração regional da Pan-Amazônia. **Revista Tempo do Mundo**, n. 27, 2021.

SILVA, I. D. C.; SANTOS, J. S.; SANTOS, A. L. S.; TEIXEIRA FILHO, J. Evolução do uso e cobertura das terras utilizando produtos do MapBiomass (1986-2021): O caso da sub-bacia no alto rio do Itapecuru, Maranhão. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. Florianópolis, 2023. **Anais** [...]. Florianópolis, SC, 2023.

SILVA, L. P.; XAVIER, A. P. C.; SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G. Modeling land cover change based on an artificial neural network for a semiarid river basin in northeastern Brazil. **Global Ecology and Conservation**, v. 21, 2020.

SILVA, V. V.; SILVA, R. G. C. Amazônia, Fronteira e Áreas Protegidas: dialética da expansão econômica e proteção da natureza. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo. v. 25, 2022.

SIQUEIRA-GAY, J.; YANAI, A. M.; LESSMANN, J.; PESSÔA, A. C. M.; BORJA, D., CANOVA, M.; BORGES, R. C. Pathways to positive scenarios for the Amazon Forest in Pará state, Brazil. **Biota Neotropica**, v. 20, n. 1, 2020.

SOUZA JUNIOR, C. M.; SHIMBO, J. Z.; ROSA, M. R.; PARENTE, L. L.; ALENCAR, A. A., RUDORFF, B. F. T.; HASENACK, H.; MATSUMOTO, M.; FERREIRA, L. G.; SOUZA FILHO, P. W. M.; OLIVEIRA, S. W.; ROCHA, W. F.; FONSECA, A. V.; MARQUES, C. B.; DINIZ, C. G.; COSTA, D.; MONTEIRO, D.; ROSA, E. R.; VÉLEZ-MARTIN, E.; WEBER, E. J.; LENTI, F. E. B.; PATERNOST, F. F.; PAREYN, F. G. C.; SIQUEIRA, J. V.; VIEIRA, J. L.; FERREIRA NETO, L. C.; SARAIVA, M. M; SALES, M. H.; SALGADO, M. P. G.; VASCONCELOS, R.; GALANO, S.; MESQUITA, V. V.; AZEVEDO, T. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, 2020.

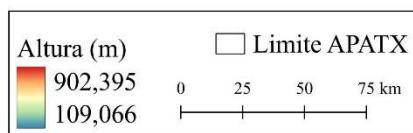
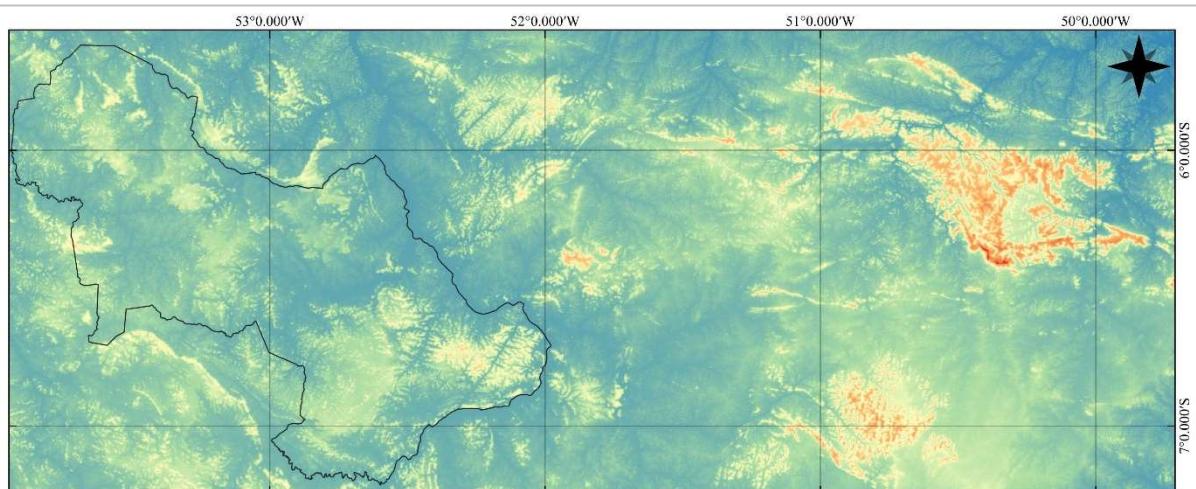
SOUZA, C. B. G.; CAMPOS A. S.; SANTOS A. M. A.; SOUZA, F. B. B.; CARVALHO, G. P.; CHAGAS, G. F. B.; BARBOSA, M. T.; SILVA, S. C. Ordenamento Territorial e Regularização Ambiental: Os Desafios da Área de Proteção Ambiental do Triunfo do Xingu/PA. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, Curitiba, v. 3, n. 4, p. 3329-3346, 2020.

THALÉS, M.; POCCARD-CHAPUIS R.; RUIVO M. L. Cartografia das frentes pioneiras e contribuição à análise do desmatamento no Pará. **Mercator**, Fortaleza, v. 20, 2021.

VICK, E. P.; BACANI, V. M. Predição de cenário futuro utilizando autômatos celulares e cadeias de Markov em área de expansão da silvicultura sobre o cerrado brasileiro. **Mercator**, Fortaleza, v. 18, 2019.

VLIET, J. V.; BREGT, A. K.; BROWN, D. G.; DELDEN, H. V.; HECKBERT, S.; VERBURG, P. H. A review of current calibration and validation practices in land-change modeling. **Environmental Modelling & Software**, v. 82, p. 174-182, 2016.

APÊNDICE A - Variável Explicativa MDE

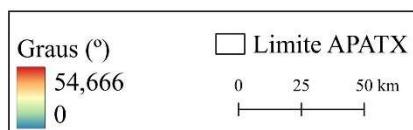
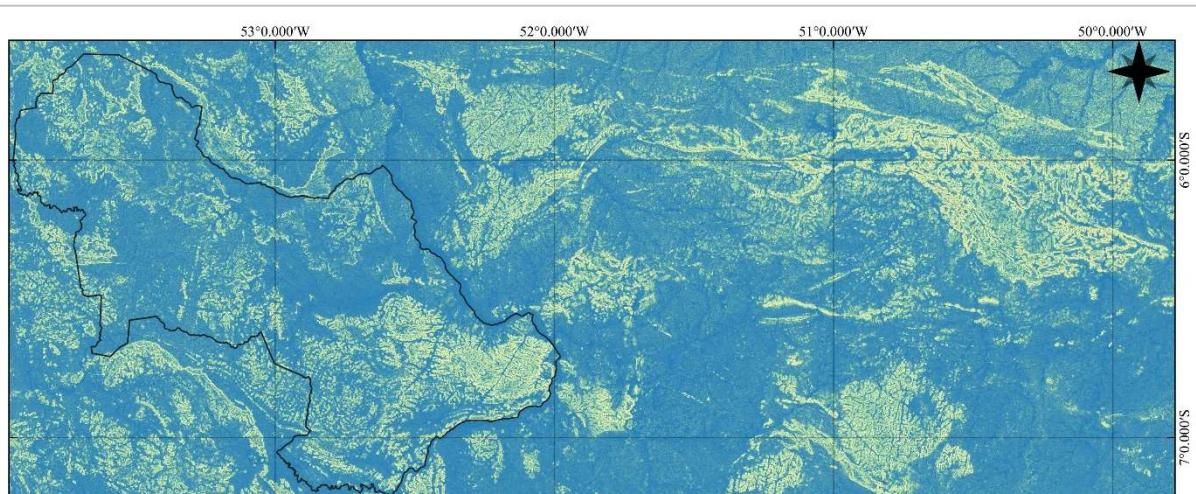


SRC: LatLong
SRG SIRGAS 2000

Variável Explicativa Modelo Digital de Elevação

Fontes:
Limite da APATX - ANA
MDE - TOPDATA
Elaboração Cartográfica: Mikaela R. Santana

APÊNDICE B – Variável Explicativa Declividade

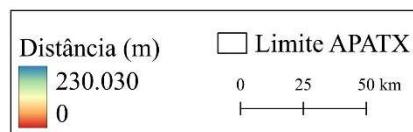
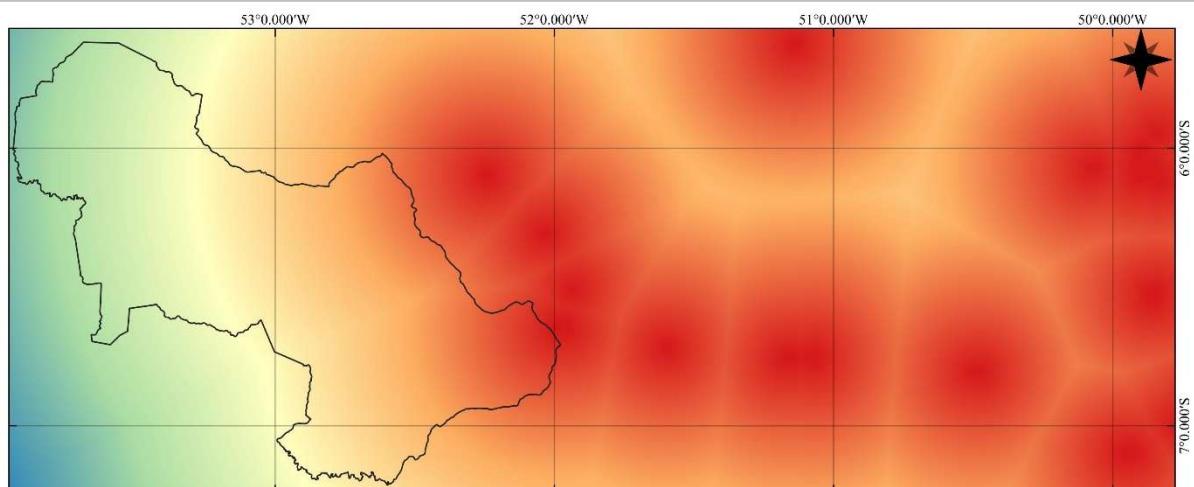


SRC: LatLong
SRG SIRGAS 2000

Variável Explicativa Declividade

Fontes:
Limite da APATX - ANA
Declividade extraída do MDE - TOPDATA
Elaboração Cartográfica: Mikaela R. Santana

APÊNDICE C – Variável Explicativa Distância de Áreas Urbanas

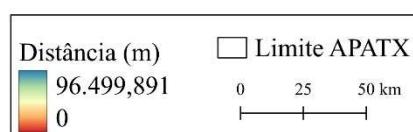
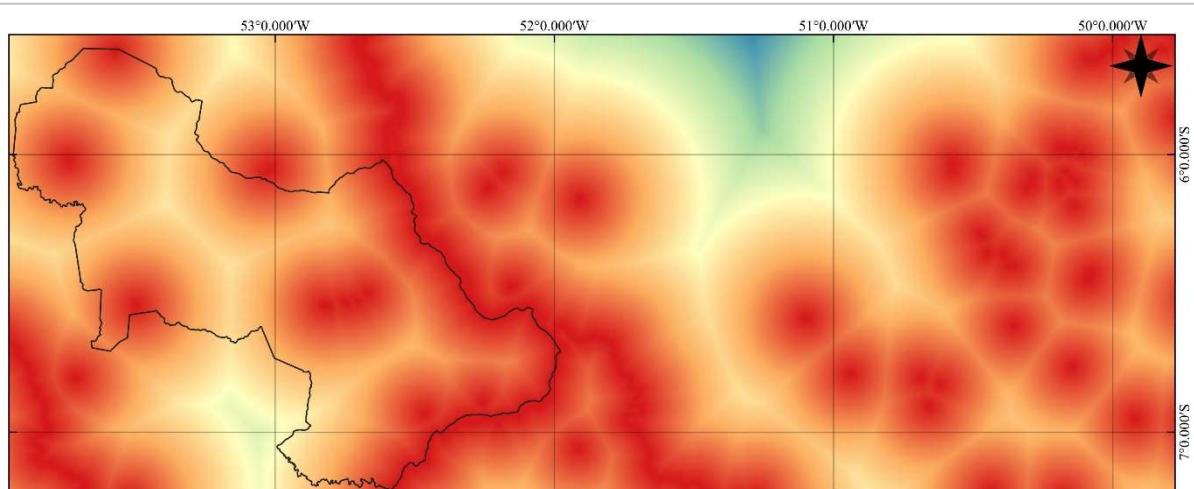


Variável Explicativa Distância de Áreas Urbanas

SRC: LatLong
SRG SIRGAS 2000

Fontes:
Limite da APATX - ANA
Mapa de distância com base em dados do IBGE
Elaboração Cartográfica: Mikaela R. Santana

APÊNDICE D – Variável Explicativa Distância de Corpos d'Água

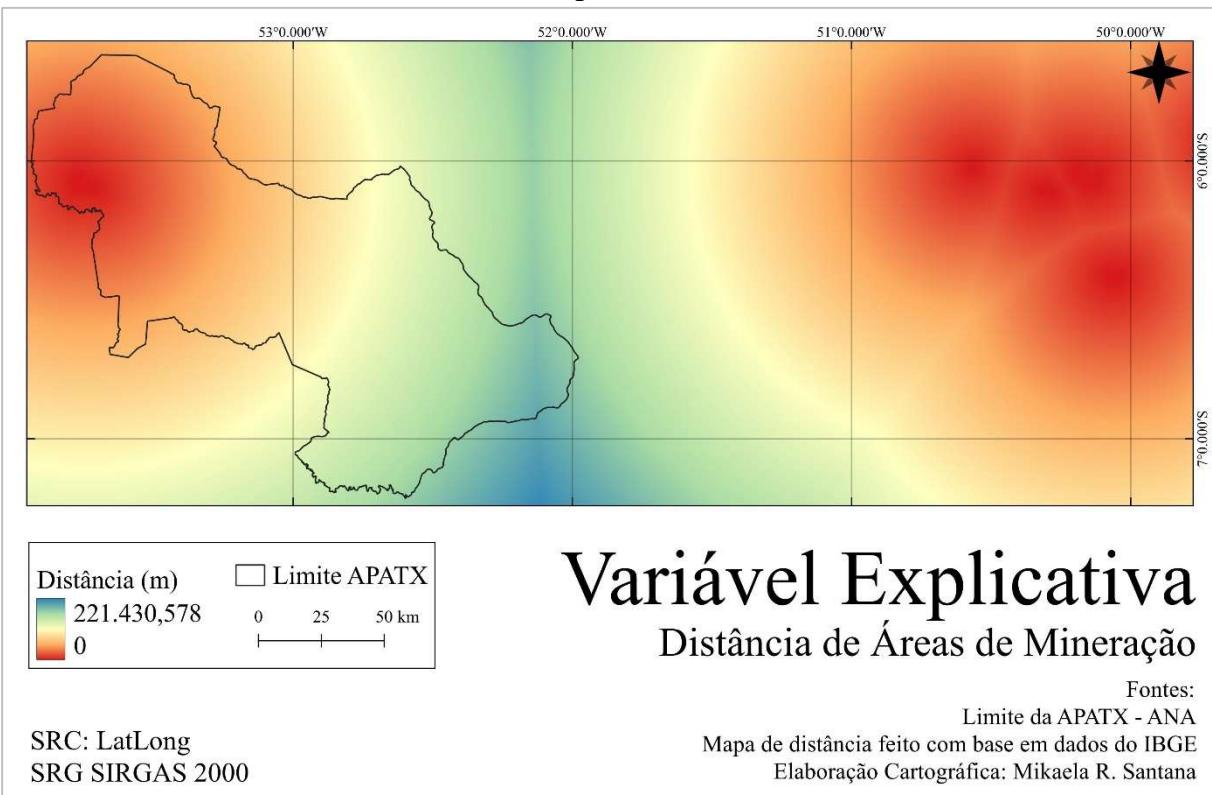


Variável Explicativa Distância de Corpos D'água

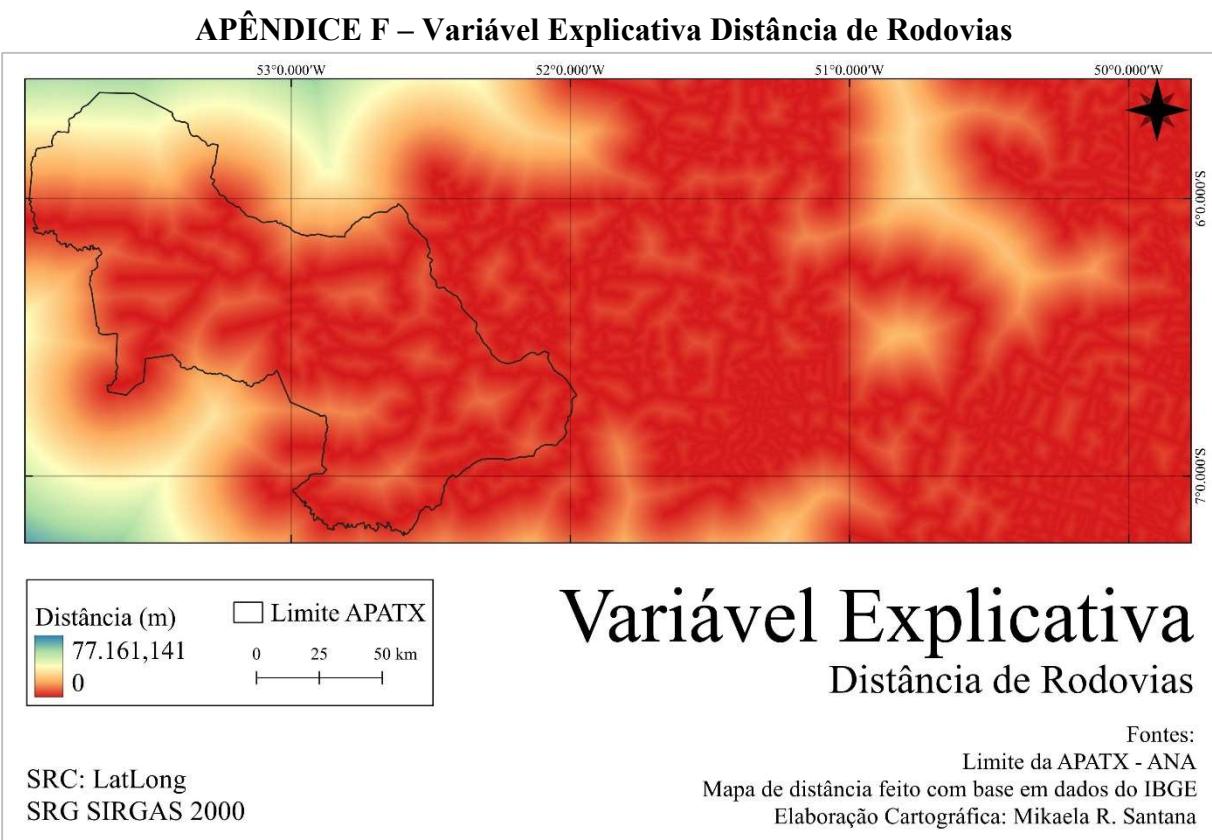
SRC: LatLong
SRG SIRGAS 2000

Fontes:
Limite da APATX - ANA
Mapa dedistância com base em dados do IBGE
Elaboração Cartográfica: Mikaela R. Santana

APÊNDICE E – Variável Explicativa Distância de Mineração

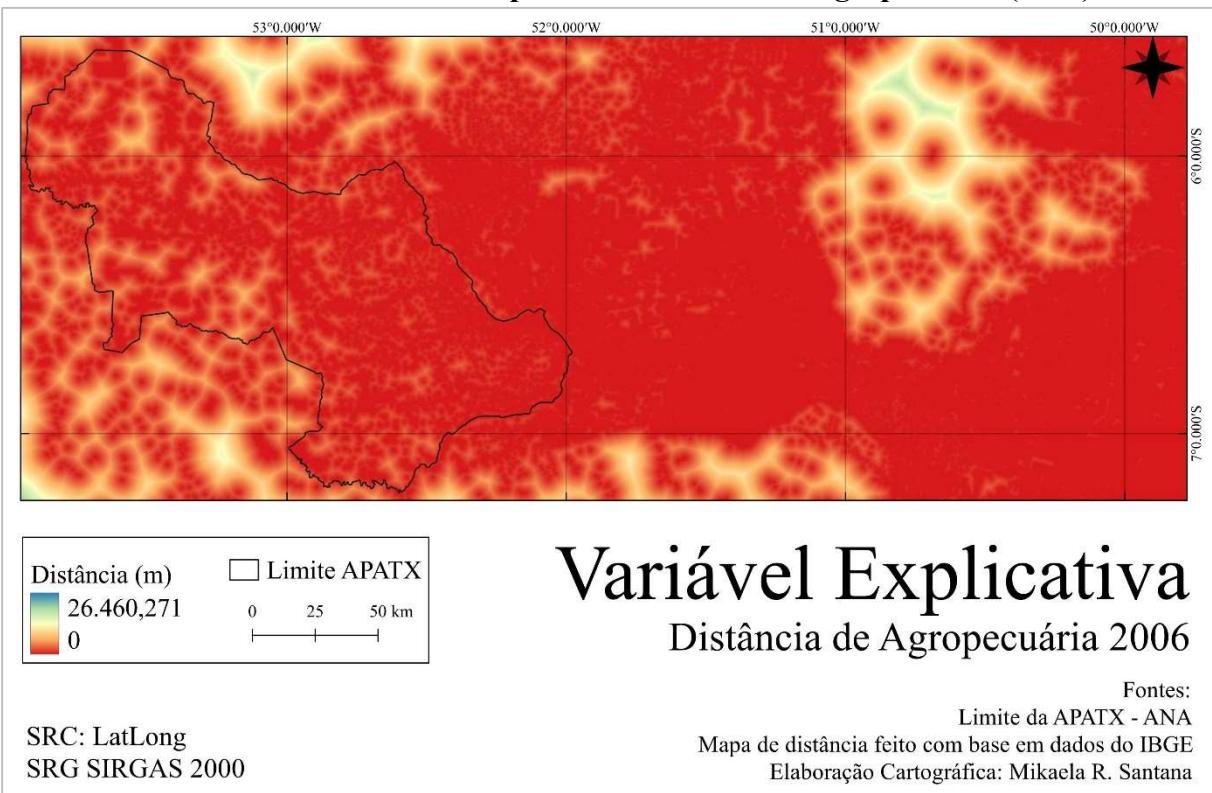


Variável Explicativa Distância de Áreas de Mineração

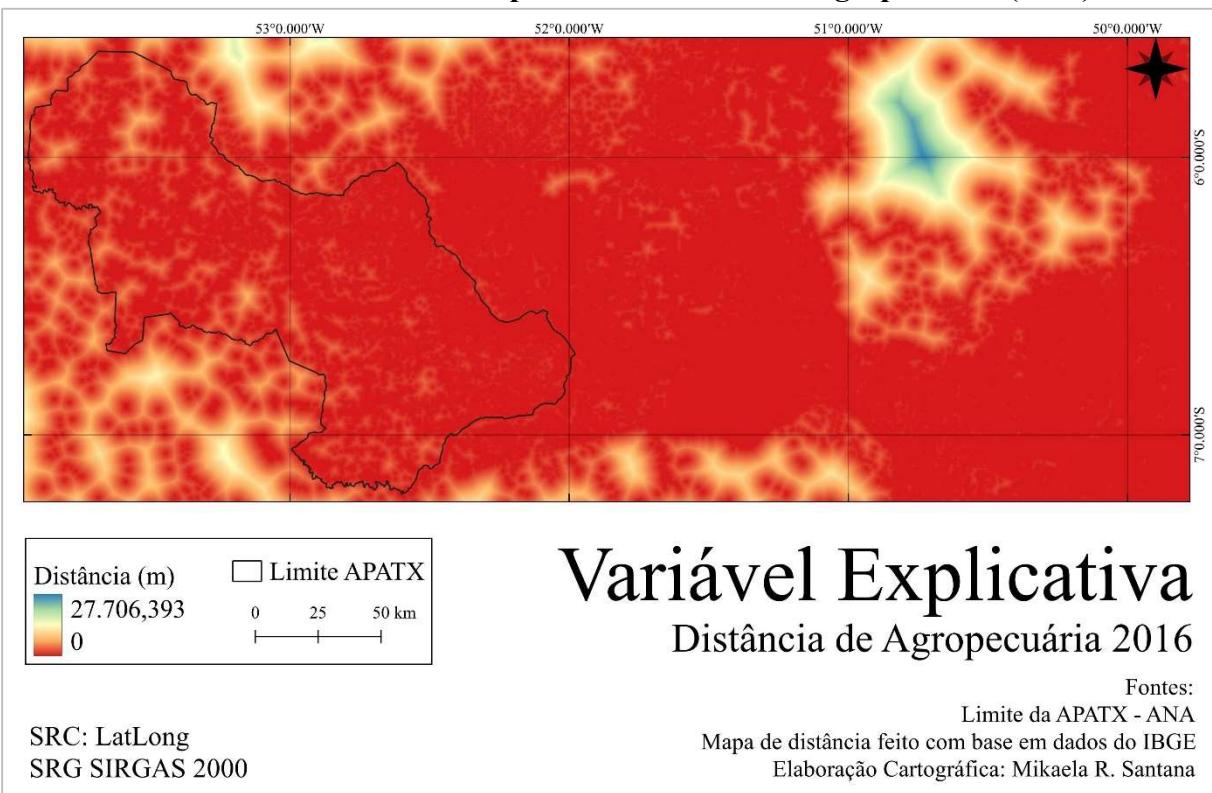


Variável Explicativa Distância de Rodovias

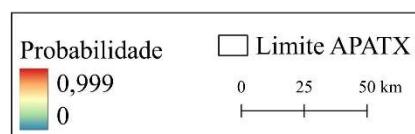
APÊNDICE G – Variável Explicativa Distância de Agropecuária (2006)



APÊNDICE H – Variável Explicativa Distância de Agropecuária (2016)



APÊNDICE I – Variável Explicativa Probabilidade de Mudanças (2006)



Variável Explicativa Probabilidade de Mudanças 2006

Fontes:

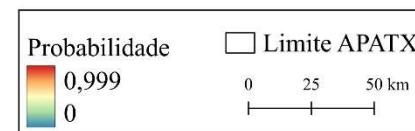
Limite da APATX - ANA

Mapa de probabilidade feito com base na imagem do MapBiomass

Elaboração Cartográfica: Mikaela R. Santana

SRC: LatLong
SRG SIRGAS 2000

APÊNDICE J – Variável Explicativa Probabilidade de Mudanças (2016)



Variável Explicativa Probabilidade de Mudanças - 2016

Fontes:

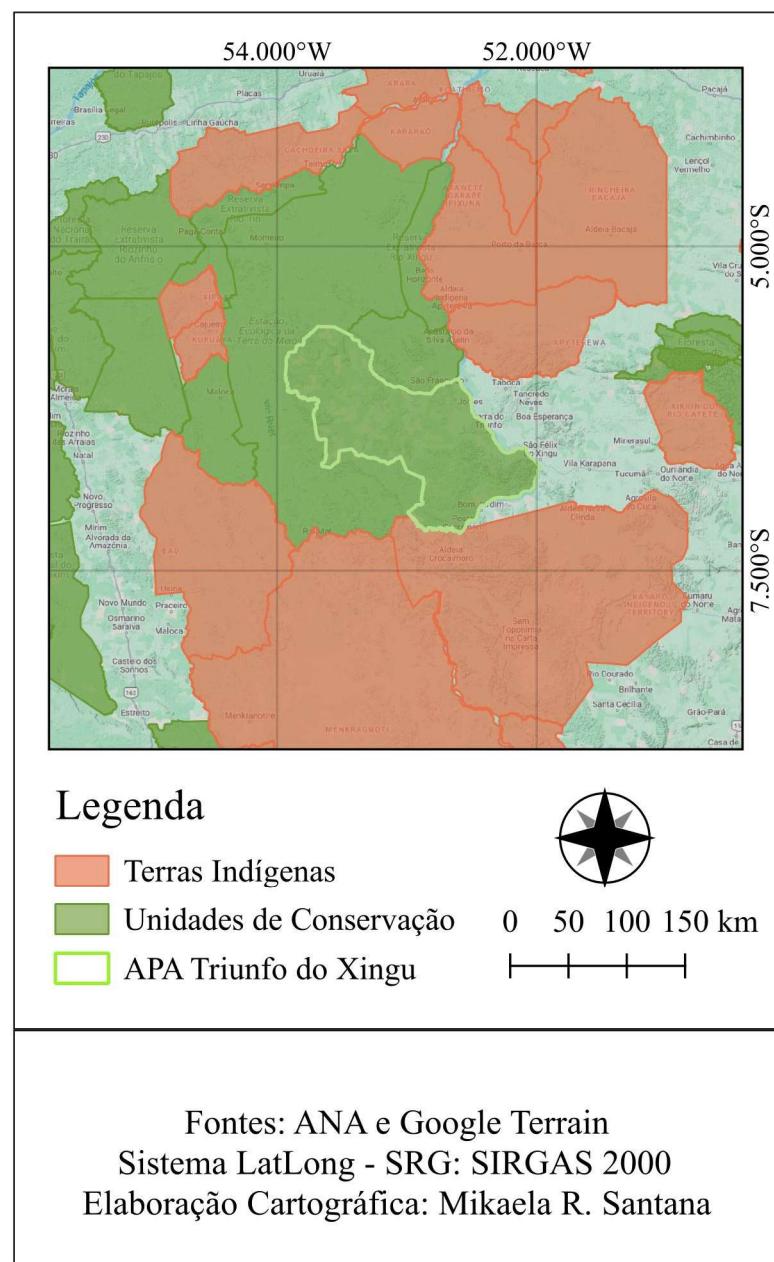
Limite da APATX - ANA

Mapa de probabilidade feito com base na imagem do MapBiomass

Elaboração Cartográfica: Mikaela R. Santana

SRC: LatLong
SRG SIRGAS 2000

APÊNDICE K – Disposição Espacial das Unidades de Conservação e Terras Indígenas no entorno da APATX



Anexo A - Expressões matemáticas para quinze pontos, dos quais todas as outras estatísticas de VALIDATE derivam

| Information of Location | $R(\mathbf{x})$ | $K(\mathbf{x})$ | $M(\mathbf{x})$ | $H(\mathbf{x})$ | $N(\mathbf{x})$ |
|-------------------------|--|---|--|--|--|
| | $\sum_{j=1}^J \min(R_{-j}, \frac{1}{j})$ | $\sum_{j=1}^J \min(R_{-j}, S_{-j})$ | $\sum_{j=1}^J \min(R_{-j}, R_{-j})$ | | |
| $K(\mathbf{x})$ | $\frac{\sum_{d=1}^D W_d \left[\sum_{j=1}^J \min(R_{dj}, E_{dj}) \right]}{\sum_{d=1}^D W_d}$ | $\frac{\sum_{d=1}^D W_d \left[\sum_{j=1}^J \min(R_{dj}, S_{dj}) \right]}{\sum_{d=1}^D W_d}$ | $\frac{\sum_{d=1}^D W_d \left[\sum_{j=1}^J \min(R_{dj}, A_{dj}) \right]}{\sum_{d=1}^D \sum_{n=1}^m W_{dn}}$ | $\frac{\sum_{d=1}^D \sum_{n=1}^m W_{dn} \left[\sum_{j=1}^J \min(R_{dnj}, E_{dnj}) \right]}{\sum_{d=1}^D \sum_{n=1}^m W_{dn}}$ | $\frac{\sum_{d=1}^D \sum_{n=1}^m W_{dn} \left[\sum_{j=1}^J \min(R_{dnj}, S_{dnj}) \right]}{\sum_{d=1}^D \sum_{n=1}^m W_{dn}}$ |
| $M(\mathbf{x})$ | $\frac{\sum_{d=1}^D \sum_{n=1}^m W_{dn} \left[\sum_{j=1}^J \min(R_{dnj}, A_{dnj}) \right]}{\sum_{d=1}^D \sum_{n=1}^m W_{dn}}$ | | | $\frac{\sum_{d=1}^D \sum_{n=1}^m W_{dn} \left[\sum_{j=1}^J \min(R_{dnj}, B_{dnj}) \right]}{\sum_{d=1}^D \sum_{n=1}^m W_{dn}}$ | |
| $H(\mathbf{x})$ | $\frac{\sum_{d=1}^D \sum_{n=1}^m W_{dn} \left[\sum_{j=1}^J \min(R_{dnj}, E_{dj}) \right]}{\sum_{d=1}^D \sum_{n=1}^m W_{dn}}$ | $\frac{\sum_{d=1}^D \sum_{n=1}^m W_{dn} \left[\sum_{j=1}^J \min(R_{dnj}, S_{dj}) \right]}{\sum_{d=1}^D \sum_{n=1}^m W_{dn}}$ | | $\frac{\sum_{d=1}^D \sum_{n=1}^m W_{dn} \left[\sum_{j=1}^J \min(R_{dnj}, F_{dj}) \right]}{\sum_{d=1}^D \sum_{n=1}^m W_{dn}}$ | |
| $N(\mathbf{x})$ | $\frac{\sum_{d=1}^D \sum_{n=1}^m W_{dn} \left[\sum_{j=1}^J \min(R_{dnj}, \frac{1}{j}) \right]}{\sum_{d=1}^D \sum_{n=1}^m W_{dn}}$ | $\frac{\sum_{d=1}^D \sum_{n=1}^m W_{dn} \left[\sum_{j=1}^J \min(R_{dnj}, S_{-j}) \right]}{\sum_{d=1}^D \sum_{n=1}^m W_{dn}}$ | | $\frac{\sum_{d=1}^D \sum_{n=1}^m W_{dn} \left[\sum_{j=1}^J \min(R_{dnj}, R_{-j}) \right]}{\sum_{d=1}^D \sum_{n=1}^m W_{dn}}$ | |

n

m

p

Information of Quantity

Fonte: Clark GCA (2024d).