



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/11.10.14.14-TDI

**EXPANSÃO DA SOJA NA REGIÃO SUDOESTE DO
PARÁ: EXPLORANDO CONEXÕES COM
INFRAESTRUTURA E VALOR DA TERRA**

Guilherme Ignácio Reis

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelas Dras. Maria Isabel Sobral
Escada, e Jussara de Oliveira
Ortiz, aprovada em 17 de agosto
de 2023.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/4A775GP>>

INPE
São José dos Campos
2024

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

Membros:

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/11.10.14.14-TDI

**EXPANSÃO DA SOJA NA REGIÃO SUDOESTE DO
PARÁ: EXPLORANDO CONEXÕES COM
INFRAESTRUTURA E VALOR DA TERRA**

Guilherme Ignácio Reis

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelas Dras. Maria Isabel Sobral
Escada, e Jussara de Oliveira
Ortiz, aprovada em 17 de agosto
de 2023.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/4A775GP>>

INPE
São José dos Campos
2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Reis, Guilherme Ignácio.

R277e Expansão da soja na região sudoeste do Pará: Explorando conexões com infraestrutura e valor da terra / Guilherme Ignácio Reis. – São José dos Campos : INPE, 2024.

xxii + 117 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/11.10.14.14-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2023.

Orientadoras : Dras. Maria Isabel Sobral Escada, e Jussara de Oliveira Ortiz.

1. Expansão do cultivo da soja. 2. Santarém. 3. Novo progresso. I.Título.

CDU 528.8:633.34(811.5)



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS
Serviço de Pós-Graduação - SEPGR

DEFESA FINAL DE DISSERTAÇÃO DE GUILHERME IGNÁCIO REIS
REG. 798711/2021, BANCA Nº 209/2023

No dia 17 de agosto de 2023, na modalidade online, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi APROVADO(A) pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em Sensoriamento Remoto, com a exigência de que o trabalho final a ser publicado deverá incorporar as correções sugeridas pela Banca Examinadora, com revisão pelo(s) orientador(es).

Título: Expansão da soja na região sudoeste do Pará: Explorando conexões com infraestrutura e valor da terra

Membros da banca:

Dr. Antônio Miguel Vieira Monteiro – Presidente – INPE
Dra. Maria Isabel Sobral Escada – Orientadora – INPE
Dra. Jussara de Oliveira Ortiz – Orientadora – INPE
Dr. Camilo Daleles Rennó – Membro Interno – INPE
Dr. Marcos Adami – Membro Interno – INPE
Dr. Danilo Araujo Fernandes – Membro Externo – UFPA



Documento assinado eletronicamente por **Antonio Miguel Vieira Monteiro, Pesquisador**, em 21/08/2023, às 15:30 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Adami, Pesquisador**, em 21/08/2023, às 15:44 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Camilo Daleles Rennó, Tecnologista**, em 29/08/2023, às 09:59 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Danilo Araujo Fernandes (E), Usuário Externo**, em 29/08/2023, às 12:31 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jussara de Oliveira Ortiz, Pesquisadora**, em 29/08/2023, às 14:20 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maria Isabel Sobral Escada, Pesquisadora**, em 31/08/2023, às 15:15 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.mcti.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **11305495** e o código CRC **20E20323**.

Referência: Processo nº 01340.006869/2023-74

SEI nº 11305495

A Terezinha Carvalho Reis

AGRADECIMENTOS

Agradeço...

As minhas orientadoras Maria Isabel Sobral Escada e Jussara de Oliveira Ortiz, pela confiança, paciência e trocas durante toda a minha trajetória no mestrado. Com seus ensinamentos, consegui dar um passo a diante no caminho da pesquisa.

Aos meus pais por todo amor e carinho incondicional ao longo de toda minha vida. Vocês são meus exemplos máximos de como a educação é parte essencial de quem somos e como ela pode melhorar nossas vidas.

A toda minha família por todo apoio e amor incondicional que vocês me proporcionaram durante toda a minha vida. Em especial à minha avó Terezinha.

A minha namorada, Angela, por todo amor, companheirismo e pelos momentos únicos que vivi ao seu lado. Obrigado pelo apoio durante as tempestades e por iluminar ainda mais os nossos dias felizes.

A Letícia, por todo apoio e suporte no processo de entrada no mestrado e no começo da minha caminhada.

Ao Diego, por nossa amizade de anos que continuou forte durante todo o mestrado. Ter você junto comigo nesta etapa que sempre sonhamos em passar juntos foi muito especial.

Ao Rômulo, que entrou na minha vida para mudá-la completamente. Agradeço toda a amizade e carinho que temos um pelo outro.

Ao Rogério (Hisashi) e Allan, Rômulo e Diego, que constituíram o meu lar durante todo o mestrado. Morar com vocês foi uma experiência única e um privilégio

Ao Gilberto, Thainara, Bruno Dias, Miguel e demais colegas de turma, por toda amizade, auxílio e trocas durante todo o mestrado. A nossa cooperação foi essencial para conseguir concluir a minha caminhada.

A Isabel, Rodrigo, Ágata, Mayara, Felipe, Murilo, Erison, Jadson, Lívia e demais integrantes do Terra Class cerrado por toda amizade dentro e fora do INPE. Estar com vocês foi parte essencial no meu crescimento.

RESUMO

A partir do final da década de 1990, o cultivo da soja gradativamente avança do bioma cerrado em direção ao bioma Amazônia. Investimentos foram feitos tanto por parte do governo federal, quanto pelo capital privado, principalmente na construção de portos e na abertura e pavimentação de rodovias, como a BR – 163 no Pará. Os municípios de Santarém, Belterra e Mojuí dos Campos, juntos foram apresentaram uma grande concentração de áreas de cultivo de soja no estado do Pará, no período entre 2004 e 2020. Em Novo Progresso, a produção de soja se expandiu a partir de 2014, com o asfaltamento da BR-163 e a abertura de portos em Miritituba. Neste estudo, trabalhamos com a hipótese de que infraestrutura logística de transporte e o valor da terra apresentam associação com a expansão da soja na Amazônia. Para testar essa hipótese, o presente trabalho se propôs a avaliar fatores, sobretudo aqueles relacionados à infraestrutura logística e à valorização da terra, por meio da construção de um modelo de regressão logística para o período de 2004 e 2020 e de um indicador de suscetibilidade à expansão da soja. A área de estudo compreendeu os municípios de Santarém, Belterra, Mojuí dos Campos (região de Santarém) e Novo progresso. Um modelo de regressão logística foi desenvolvido para identificação de fatores associados à expansão da soja na região de Santarém. Índices como Tempo de Viagem até os portos, nos períodos seco e chuvoso, e Índice de Valorização da Terra foram criados e utilizados no processo de modelagem, juntamente com variáveis de uso e cobertura da terra, desmatamento, áreas protegidas e fundiárias. O modelo gerado apresentou ajuste de 0,972 na área sob a curva. Um índice de suscetibilidade à expansão da soja foi desenvolvido para ambas as áreas de estudo com a técnica *Analytic Hierarchy Process*, considerando-se variáveis ambientais, infraestrutura, relevo, áreas protegidas e fundiárias. A escolha das variáveis baseou-se em parte, nos resultados obtidos pelo modelo. Como resultado dessa análise, encontramos 6.821 km² (25% da área total) e 3.861 (9% da área total) de áreas com maior suscetibilidade à expansão da soja na região de Santarém e Novo Progresso, respectivamente. Os resultados obtidos nesta pesquisa confirmam a hipótese levantada sobre a logística de transporte e sobre a valorização da terra, como importantes elementos associados à expansão da soja, entre outros fatores. Destaca-se também o desmatamento do período de 2004 a 2020, associado à expansão da soja, como um elemento importante na geração de estoque de terras para essa atividade. Na Amazônia, os sistemas agrários relacionados com o cultivo da soja, concorrem muitas vezes com sistemas agrários camponeses estando frequentemente em situações de disputa pela terra. Por essa razão, a identificação de áreas suscetíveis à expansão de soja é um passo importante no planejamento e ordenamento territorial dessa região, possibilitando criar políticas que controlem e assegurem o acesso à terra às populações locais.

Palavras-chave: Expansão do cultivo da soja, Santarém, Novo Progresso.

EXPANSION OF SOY IN THE SOUTHWEST REGION OF PARÁ: EXPLORING CONNECTIONS WITH INFRASTRUCTURE AND LAND VALUE

ABSTRACT

From the late 1990s onwards, soybean cultivation gradually advanced from the cerrado biome towards the Amazon biome. Investments were made both by the federal government and by private capital, mainly in the construction of ports and the opening and paving of highways, such as the BR-163 in Pará. The municipality of Santarém and neighboring municipalities were the ones with the highest concentration of soybean cultivation in the state of Pará in the period. In Novo Progresso (NP) soy production expanded from 2014 onwards, with the paving of the Br-163 and the opening of ports in Miritituba. In this study, we hypothesize that transport logistics infrastructure and land value are associated with the expansion of soy in the Amazon. To test this hypothesis the present work proposed to evaluate factors, especially those related to the logistical infrastructure and land valuation, through the construction of a logistic regression model for the period between 2004 and 2020 and an indicator of susceptibility to soybean expansion. The study area comprised the municipalities of Santarém, Belterra, Mojuí dos Campos (Santarém region) and Novo Progresso (NP region), PA. A logistic regression model was developed to identify factors associated with soybean expansion in the Santarém region. The municipality of Novo Progresso was not analyzed because it is in an initial stage, with few areas with soy. Indices such as Travel Time (TV) to ports in dry and rainy seasons and Land Valuation Index (IVT) were created and used in the modeling process, along with variables of land use and land cover, deforestation, protected and land tenure. The model generated presented an adjustment of 0.949 in the area under the curve (AUC). An index of susceptibility to soybean expansion was developed for both study areas using the AHP (Analytic Hierarchy Process) technique, considering environmental, infrastructure, topography, protected areas and land variables. The choice of variables was based in part on the results obtained by the model, but IVT and TV were not used. As a result of this analysis, we found 6,821 km² (25% of the total area) and 3,861 km² (9% of the total area) of areas with greater susceptibility to soybean expansion in the Santarém and Novo Progresso regions, respectively. The results obtained in this research confirm the hypothesis raised about transport logistics and land valuation, as important elements associated with the expansion of soy, among other factors. Also we point out the deforestation between 2004 and 2020, associated with the expansion of soy, as an important element in the generation of land stock for this activity. In the Amazon, agrarian systems related to soy cultivation often compete with peasant agrarian systems, often being in situations of dispute over land. For this reason, the identification of areas susceptible to the expansion of soy is an important step in the planning and territorial organization of this region, making it possible to create policies that control and ensure access to land for local populations.

Keywords: Expansion of soybean cultivation, Santarém, Novo Progresso.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 3.1 – Mapa de localização da região de Santarém.	20
Figura 3.2 - Mapa de localização da região de Novo Progresso	21
Figura 3.3 – Etapas metodológicas do estudo.	28
Figura 3.4 – Metodologia para a elaboração das variáveis de tempo de viagem.	37
Figura 3.5 – Exemplificação do funcionamento do cálculo da estimativa de tempo de viagem.	41
Figura 3.6 - Matriz de comparação pareada das variáveis.	44
Figura 3.7 – Células com problemas na classificação das áreas de cultivo de soja	46
Figura 3.8 – Distribuição das amostras na região de Santarém.	47
Figura 4.1 – Exemplo da ocorrência da transição inconsistente <i>Vegetação Secundária</i> (2004) – <i>Floresta</i> (2020).	53
Figura 4.2 – Exemplo da ocorrência da transição inconsistente <i>Pastagem</i> (2004) – <i>Floresta</i> (2020).	54
Figura 4.3 – Exemplo da ocorrência da transição inconsistente <i>Hidrografia</i> (2004) – <i>Floresta</i> (2020).	55
Figura 4.4 – Exemplo da ocorrência da transição inconsistente <i>Floresta</i> (2004) – <i>Não Floresta</i> (2020).	56
Figura 4.5 – Exemplo da ocorrência da transição inconsistente <i>Não Floresta</i> (2004) – <i>Floresta</i> (2020).	57
Figura 4.6 – Exemplo da ocorrência da transição inconsistente <i>Vegetação secundária</i> (2004) – <i>Floresta</i> (2020).	58
Figura 4.7 – Mapas de uso e cobertura da terra da região de Santarém para os anos de 2004 e 2020.	59
Figura 4.8 –Matriz de transição de classes entre 2004 e 2020 na Região de Santarém.	59
Figura 4.9–Áreas de Floresta convertidas em Pastagem entre 2004 e 2020 na região de Santarém.	61
Figura 4.10 –Áreas de Floresta convertidas em Vegetação Secundária entre 2004 e 2020 na região de Santarém.	63

Figura 4.11 – Expansão das áreas de cultivo de soja entre 2004 e 2020 na região de Santarém.	65
Figura 4.12 –Expansão do cultivo de soja próximo da BR-163 (A) e da PA-370 (B)...	66
Figura 4.13 –Expansão das áreas de cultivo de soja nos assentamentos PAC Bela Terra I e PAC Bela Terra II.	67
Figura 4.14 –Expansão do cultivo de soja em áreas desmatadas 2004 e 2020.....	68
Figura 4.15 -Mapas de uso e cobertura da terra da Região de Novo Progresso para os anos de 2004 e 2020.....	69
Figura 4.16 -Matriz de transição de classes entre 2004 e 2020 na Região de Santarém.	69
Figura 4.17 -Áreas de Floresta convertidas em Pastagem entre 2004 e 2020 na região de Novo Progresso.	72
Figura 4.18 – Áreas de expansão do cultivo de soja em Novo Progresso.	73
Figura 4.19 – Expansão da malha viária entre 2004 e 2020 na região de Santarém.	74
Figura 4.20 – Expansão da rede viária entre 2004 e 2020 nas células onde ocorreu a expansão do cultivo da soja.	76
Figura 4.21 - Estrada que corta a Flona Jamanxim.	77
Figura 4.22 – Expansão da malha viária entre 2004 e 2020 na região de Novo Progresso.	77
Figura 4.23 – Expansão da rede viária entre 2004 e 2020 nas células onde ocorreu a expansão do cultivo da soja.	78
Figura 4.24 – Mapas da variável de tempo de viagem até o porto, em 2004, no período seco (A1) e no período chuvoso (B1), e em 2020 no período seco (A2) e período chuvoso (B2) na região de Santarém.	80
Figura 4.25 – Histograma de distribuição da variável de tempo de viagem no período seco em 2004 (A.1) e no período chuvoso (B.1) e em 2020 no período seco (A.2) e chuvoso (B.2), para a região de Santarém.	81
Figura 4.26 – Distribuição da variável de tempo de viagem na região de Santarém.	82
Figura 4.27 –Mapas da variável de tempo de viagem até o porto, em 2004, no período seco (A1) e no período chuvoso (B1), e em 2020, no período seco (A2) e no período chuvoso (B2), na região de Novo Progresso.	84

Figura 4.28 – Histograma de distribuição da variável de tempo de viagem até o porto, em 2004, no período seco (A1) e no período chuvoso (B1), e em 2020, no período seco (A2) e período chuvoso (B2), na região de Novo Progresso.	85
Figura 4.29 - Distribuição da variável de tempo de viagem na região de Novo Progresso	86
Figura 4.30 - IVT nos anos de 2004 e 2020 na Região de Santarém.	88
Figura 4.31 – Histograma de distribuição da variável IVT no ano de 2004.....	88
Figura 4.32 – Variação do IVT entre 2004 e 2020 em Santarém.....	89
Figura 4.33 - IVT nos anos de 2004 e 2020 em Novo Progresso.....	91
Figura 4.34 - Histograma de distribuição da variável IVT nos anos de 2004.	91
Figura 4.35 – Variação do IVT entre 2004 e 2020 em Novo Progresso.	93
Figura 4.36 – Comparação do resultado do modelo de regressão logístico (esquerda) e áreas de expansão do cultivo de soja (direita)	95
Figura 4.37 – Curva ROC e Área sob a curva (AUC) do modelo proposto.....	96
Figura 4.38– Matriz de comparação pareada.....	99
Figura 4.39 – Resultado do índice de Suscetibilidade a expansão da soja na região de Santarém.	102
Figura 4.40 – Distribuição do índice de Suscetibilidade a expansão da soja na região de Santarém.	103
Figura 4.41 – Resultado do índice de suscetibilidade à expansão da soja na região de Novo Progresso.	104
Figura 4.42 – Distribuição do índice de Suscetibilidade à expansão da soja na região de Novo Progresso	105

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1- Fatores utilizados nos estudos analisados.	16
Tabela 3.1 - Dados utilizados para a produção das variáveis	23
Tabela 3.2 - Exemplo de transições possíveis entre classes de uso e cobertura da terra.	30
Tabela 3.3 - Exemplo das situações em que as edições foram realizadas para algumas transições inconsistentes observadas na região de Santarém de acordo com as regras estabelecidas.	32
Tabela 3.4 – Variáveis analisadas e associadas ao processo de expansão da soja.	33
Tabela 3.5 - Velocidades atribuídas às classes de uso e cobertura da terra.	38
Tabela 3.6 – Variáveis utilizadas na construção do IVT.	42
Tabela 3.7 – Pesos derivados da AHP.	45
Tabela 3.8 – Variáveis utilizadas na composição do índice de suscetibilidade.	49
Tabela 4.1 – Áreas total e relativa das classes nos anos de 2004 e 2020 na Região de Santarém.	60
Tabela 4.2 - Áreas total e relativa das classes nos anos de 2004 e 2020 na Região de Novo progresso.	70
Tabela 4.3 – Coeficientes beta do modelo de regressão logístico.	94
Tabela 4.4 – Pesos derivados da AHP.	100

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AB-p	Índice de proporção de Área Aberta
AHP	<i>Analytical Hierarchy Process</i>
AIC	Critério de Informação de Akaike
AML	Amazônia Legal
Assent	Índice de proporção de assentamentos
AST-p	Índice de proporção de assentamentos
AUC	Área sob a Curva
AU-d	Índice de distância de área urbana
CAR	Cadastro Ambiental Rural
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CRT-p	Índice de proporção de Imóveis certificados
DCV	Índice de mediana da declividade
Desmat	Índice de proporção de área desmatadas após o ano de 2008
DETER	Deteção de Desmatamento em Tempo Real
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte
EMB-p	Índice de proporção de embargos
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EST-d	Índice de distância de estradas vicinais
ESTP-d	Índice de distância de estradas principais
ETCs	Estações de Transporte de Carga
Flr	Índice de proporção de áreas de Floresta
FLR-p	Índice de proporção de cobertura florestal
GTS	Grupo de Trabalho da Soja
HAND	<i>Height Above the Neareast Drainage</i>
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ILUC	<i>Indirect Land Use Change</i>
IMAZON	Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IR-m	Índice de tamanho médio dos imóveis
IVT	Índice de Valorização da Terra
MNT	Modelo Numérico de Terreno
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
Past	Índice de proporção de áreas de pastagem
Plt	Índice de proporção de Platô
PPCDAM	Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal
PRODES	Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite
RIO-d	Índice de distância de rios
ROC	<i>Receiver Operating Characteristic Curve</i>
SIGEF	Sistema de Gestão Fundiária
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TAC	Termo de Ajuste de Conduta
TI	Índice de proporção de terras indígenas
TI-p	Índice de proporção de terras indígenas
Tmcar	Índice do tamanho médio do imóvel (CAR)
TVp	Índice do tempo de viagem até o porto no período chuvoso
Tvu	Índice do tempo de viagem até a área urbana mais próxima no período chuvoso
UC	Índice de proporção de unidades de conservação
UC-p	Índice de proporção de unidade de conservação
VIF	<i>Variance Inflation Factor</i>
VS	Índice de proporção de áreas de Vegetação Secundária
VS-p	Índice de proporção de Vegetação Secundária

SUMÁRIO

	Pág.
1 INTRODUÇÃO	1
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	8
2.1 O avanço da fronteira agrícola na Amazônia	8
2.2 A expansão da soja na Amazônia.....	11
2.3 Fatores condicionantes da expansão da soja na Amazônia	16
2.4 Modelo de regressão Logística.....	18
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	20
3.1 Áreas de estudo	20
3.2 Material	23
3.3 Métodos.....	26
3.3.1 Adequação do dado de uso e cobertura da terra do projeto TerraClass.....	29
3.3.2 Produção de variáveis	32
3.3.2.1 Produção de variáveis de tempo de viagem	36
3.3.2.2 Produção das variáveis relacionadas ao Índice de Valorização da Terra (IVT)	41
3.3.3 Modelo de regressão logística.....	45
3.3.4 Índice de suscetibilidade a expansão da soja	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
4.1 Análise do refinamento dos dados de uso e cobertura da terra do projeto TerraClass	52
4.2 Análise das transições do uso e cobertura da terra.....	59
4.2.1 Região de Santarém	59
4.2.2 Região de Novo Progresso.....	68
4.3 Análise das variáveis de tempo de viagem.....	74
4.3.1 Resultados da atualização das malhas viárias	74
4.3.2 Estimativa de tempo de viagem	79
4.4 Geração e Análise do índice de Valorização da Terra - IVT	87
4.5 Análise do modelo de regressão logística para a Região de Santarém	93

4.6 Índice de suscetibilidade à expansão da soja	98
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

1 INTRODUÇÃO

A demanda global por alimentos apresenta uma tendência de crescimento para as próximas décadas. Para suprir parte dessa demanda, um volume cada vez maior de terras é destinado à produção de commodities agrícolas (FOLHES; FERNANDES, 2022). A partir da década de 1990, o cultivo da soja tem ganhado proeminência na Amazônia e passa a influenciar as mudanças no uso e cobertura da terra na região (BARONA et al., 2010). Tais transformações são resultado de uma lógica de desenvolvimento econômico que se baseia, sobretudo, na busca do atendimento das demandas do mercado internacional (NEPSTAD et al., 2006).

Na América do Sul entre os anos de 1961 e 2020, a área destinada ao cultivo da soja aumentou de 0,26 para 60 milhões de hectares e a produção aumentou de 0,30 para 186 milhões de toneladas. Em 2020, o Brasil concentrou 60% das áreas agrícolas para o cultivo da soja (37 milhões de hectares), que representou 65% (121 milhões de toneladas) da produção no continente, sendo que na Amazônia foram produzidos 7 milhões de toneladas e foram cultivados 2 mil hectares de soja (SONG et al., 2021). No ano de 2023, o país se destaca como o maior produtor de soja do mundo, com uma produção de 154 milhões de toneladas (FAO, 2022; EMBRAPA, 2023).

A expansão do cultivo da soja na região Centro-Oeste se inicia na década de 1970. Neste primeiro momento, o processo se deu pelo desenvolvimento de novas variedades de soja que pudessem ser adaptadas às condições edafoclimáticas e cultivadas em regiões de baixas latitudes. Com a redução da produção nos Estados Unidos, maior produtor à época, o Brasil se tornou um fornecedor alternativo importante para o mercado global (MARTINELLI et al., 2017). A partir do final da década de 1990 ocorre um gradativo avanço do cultivo da soja do bioma cerrado em direção ao bioma Amazônia, principalmente no norte do estado do Mato Grosso e no estado do Pará (IBGE, 2020). A expansão da soja na Amazônia tem como referência o modelo de produção adotado na região Centro Oeste, onde o cultivo se desenvolve principalmente em média e grandes fazendas utilizando técnicas modernas de produção (COSTA, 2012).

No estado do Pará, a região de Santarém, que engloba os municípios de Mojuí dos Campos e Belterra, é um dos locais onde o cultivo de soja mais se concentra atualmente.

O levantamento anual de safras realizado pela CONAB¹ indica que a soja começou a ser cultivada na região na safra de 1997/1998 (SAUER, 2018). No município de Novo Progresso, também no estado do Pará, a produção da soja se iniciou na safra de 2005/2006 (IBGE, 2023), porém só se consolidou após 2014, com a instalação de infraestrutura para o escoamento da produção.

A expansão da soja na Amazônia nas últimas décadas foi incentivada por investimentos públicos em infraestrutura voltada ao transporte e exportação da soja, em grande parte pelo governo federal (SAUER, 2018). Esses investimentos se iniciam com o plano de conclusão da pavimentação do trecho da BR – 163 no estado do Pará no início dos anos 2000, dentro do escopo do programa Avança Brasil. A conclusão da pavimentação desta rodovia acontece em 2019 (CARDOSO, 2010; BARROS, 2019). No Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), realizado entre os anos de 2003 e 2016, os investimentos em infraestrutura passam a combinar capital público e privado. Um empreendimento importante construído dentro do escopo do PAC foi o terminal de cargas da empresa Cargill em Santarém, que iniciou suas operações em 2003. O início das operações do terminal em Santarém provocou mudanças consideráveis na logística do escoamento da soja produzida na região Centro Oeste, reduzindo consideravelmente o custo do transporte (RODRIGUES, 2021). Em 2014, o porto de Miritituba é inaugurado no município de Itaituba, também no estado do Pará. A construção deste porto foi realizada dentro do escopo do recente projeto Arco Norte, que consistiu na criação de uma rede de terminais de cargas e portos privados acima do paralelo 12 (BARROS, 2019).

Após o início das operações do terminal de cargas de Santarém e do porto de Miritituba, ocorre um aumento considerável da área destinada ao cultivo da soja nos municípios próximos a esses empreendimentos. Na região de Santarém em 2004 foram plantados 16.000 hectares. Em 2014, dez anos após o início das operações do terminal, foram plantados 39.000 hectares de soja (IBGE, 2022). De acordo com a empresa Cargill, em 2018, 5% do total de grãos recebidos no terminal de Santarém foram produzidos nos municípios de Santarém, Belterra e Mojuí dos Campos².

¹ <https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/safra-serie-historica-graos.html>

² https://www.cargill.com.br/pt_BR/2018/santarem

As operações do porto de Miritituba têm influenciado indiretamente a produção de soja em municípios vizinhos de Itaituba, como Novo Progresso e Altamira (BARROS, 2019). Entre os anos de 2006 e 2014, a área destinada ao cultivo de soja no município se manteve em 1.000 hectares, porém, a partir de 2015 ocorreu um crescimento da área total de cultivo de soja no município. De acordo com o dado da Pesquisa Agrícola Municipal a área plantada de soja era de 20.000 hectares em 2021 (IBGE, 2022).

Além da melhoria da infraestrutura logística, outros fatores podem explicar a expansão da soja na região de Santarém e de Novo Progresso, tais como: (a) a disponibilidade de terras relativamente baratas (muitas já desmatadas e com pasto) com boas perspectivas de ganho imobiliário; (b) aumento da margem de lucro na cultura de soja devido às sucessivas altas no preço da saca no mercado internacional e ao aumento do valor do dólar; (c) incentivos governamentais, especialmente crédito com taxas de juro favoráveis; (d) condições ambientais favoráveis à mecanização do cultivo em ambas as localidades (SAUER, 2018).

Atualmente, a soja é o produto agrícola mais exportado pelo Brasil, desempenhando um importante papel no processo de consolidação do modelo do agronegócio brasileiro (DELGADO, 2013; FLEXOR; LEITE, 2017). Contudo, o modelo de produção e expansão do cultivo da soja suscita diversas preocupações, sobretudo na região amazônica, devido ao aumento na disparidade socioeconômica entre pequenos e grandes produtores e aos conflitos por terras que emergem nessas regiões (STEWART, 2006).

Um dos maiores debates em relação à inserção do cultivo da soja na Amazônia relaciona-se com o aumento da taxa de desmatamento. No início dos anos 2000 houve um crescimento expressivo do desmatamento na região, creditado por alguns autores (GOLLNOW et al., 2018), à expansão do cultivo da soja, entretanto, a taxa de desmatamento apresentou uma tendência de decréscimo no período de 2005 até o ano de 2014. Nepstad et al. (2017) descrevem três fases que sintetizam o processo de expansão da soja na Amazônia e as tendências do desmatamento nesta região, entre os anos 2000 e 2013. Embora o desmatamento da Amazônia não possa ser explicado diretamente pelas dinâmicas do cultivo de soja, como sugerem os autores, nem possa ser atribuído à apenas um fator, a divisão em períodos é útil para contextualizar o processo de expansão da soja nos diferentes cenários de desmatamento, observando a importância das políticas de

comando e controle e dos acordos com o setor privado. Na primeira fase mencionada pelos autores, que contempla o final dos anos 1990 até o ano 2004, verifica-se um aumento considerável nas taxas de desmatamento e no aumento do cultivo da soja devido ao aumento da demanda internacional, elevação do preço da soja e, principalmente à ineficácia das políticas de fiscalização e controle do desmatamento. Na segunda fase, entre os anos de 2005 e 2008, a rentabilidade da produção de soja diminuiu, enquanto a capacidade de monitoramento e fiscalização do desmatamento aumenta consideravelmente com o lançamento do sistema de Detecção de Desmatamento em Tempo Real (DETER), que emite alertas rápidos de alterações na cobertura florestal da Amazônia, entre outras medidas. Outro marco importante para a redução do desmatamento do ponto de vista da produção de soja, foi o acordo da Moratória da Soja, um compromisso firmado por toda cadeia produtiva para assegurar a comercialização de soja produzida apenas em áreas livres de desmatamento após junho de 2008 (ABIOVE, 2021). A terceira fase refere-se ao período de 2009 a 2013, na qual a rentabilidade da produção da soja aumentou e a tendência de declínio das taxas de desmatamento se manteve. Esse declínio se deve a um conjunto de fatores, podendo-se destacar a eficácia das medidas de comando e controle adotadas para monitorar e fiscalizar o desmatamento e a criação de programas que impem o acesso ao crédito rural em imóveis que apresentavam histórico de desmatamento dentro dos seus limites. Além das medidas de comando e controle, nesse período o estoque de terras sem mata produzido na primeira fase também exerce um papel regulador na redução do desmatamento verificado nesse período.

A partir de 2014 até 2021, verifica-se uma tendência de aumento da taxa de desmatamento medida pelo Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (PRODES). Este aumento é provocado principalmente pelo enfraquecimento dos órgãos federais responsáveis pela conservação e fiscalização das áreas florestais e pela falta de investimentos em operações de fiscalização (Messias et al., 2021). O retorno do aumento da taxa de desmatamento após o ano de 2014 trouxe à tona novamente questionamentos sobre o impacto da soja no desmatamento na Amazônia, entre outros fatores. Nesse período, a área plantada na Amazônia aumentou de 1178 para 2331 km² (CONAB, 2022).

Conforme apresentado por Gibbs et al. (2015), após o acordo da moratória da soja (2008) passar a vigorar, é observada uma tendência de decréscimo da conversão direta de áreas de floresta para o cultivo da soja. Nos dois anos anteriores ao início da moratória, 2007 e 2006, 30% da área de expansão da soja ocorrida na Amazônia se deu em áreas de floresta. Após o acordo, esta proporção apresenta uma queda acentuada até chegar em 1% no ano de 2014 (GIBBS et al., 2015). Contudo, de acordo com o relatório anual da moratória da soja de 2021 produzido pelo Grupo de Trabalho da Soja (GTS), há uma tendência de aumento na área de cultivo em desacordo com a moratória em 102 municípios que concentram 98% de toda a soja produzida na Amazônia referente à safra de 2019/2020 e. Na safra de 2016/2017, o grupo aponta que havia 47.400 hectares de soja em desacordo com o acordo da moratória, já na safra de 2019/2020 foram verificados 107.700 hectares em desacordo com a moratória (ABIOVE, 2021).

Alguns autores apontam a expansão da soja como um fator indireto associado ao desmatamento - em inglês ILUC – *Indirect Land Use Change*³, muitas vezes difícil de comprovar. Arima et al. (2011) sugerem que parte do desmatamento verificado na Amazônia está ligado à expansão das áreas de cultivo de soja. Os autores partem da hipótese de que as novas áreas de cultivo de soja substituem antigas áreas de pastagem e, como a demanda por carne bovina se mantém alta, novas áreas de pastagem são abertas em áreas mais distantes substituindo as áreas de floresta. As mudanças indiretas apontadas pelos autores ocorrem em áreas distantes das áreas de cultivo de soja o que dificulta a comprovação dessa hipótese. No trabalho de Paula (2021), realizado na região da Bacia do rio Curuá-Una, em Santarém e municípios vizinhos, os resultados sugerem que a conversão de pastagem e de cultivo de pequena escala possa estar relacionada com a conversão da floresta em áreas próximas. A autora se baseia em entrevistas realizadas por Santos (2020), que indica que parte das mudanças verificadas na região podem ter ocorrido devido ao aumento do preço da terra após o estabelecimento do cultivo de soja. Com o aumento do preço da terra, e a venda de terras em áreas pressionadas por essa nova

³O ILUC é o efeito da substituição de um tipo de uso da terra por outro, desencadeando a expansão do uso da terra que foi substituído para um outro local (BERTZKY, 2010).

economia, pequenos e médios produtores rurais se estabeleceram em áreas menos valorizadas, com menos infraestrutura geralmente em áreas florestais.

Neste trabalho, avaliamos a hipótese de que a infraestrutura logística, representada pelo indicador de Tempo de Viagem (TV), e o mercado de terras, representado pelo Índice de Valorização da Terra (IVT) e pelo desmatamento, são fatores importantes associados à expansão da soja na área de estudo. O desmatamento é considerado aqui como um indicador do processo de transformação da “terra com mata” em “terra sem mata”, ou seja, indica a transformação da terra com mata originária para a mercadoria “terra”, de acordo com o processo de *produção de terras novas* descrito por Costa (2012). Para avaliar esta hipótese, analisamos a expansão da soja e os fatores associados à essa dinâmica por meio de um modelo de regressão logística, desenvolvido para a região de Santarém para o ano de 2020. O município de Novo Progresso não foi analisado a partir do modelo de regressão logístico por se encontrar em estágio inicial, apresentando poucas áreas com soja, cerca de 12.500 há, contra 75.000 ha presentes na região de Santarém em 2020, o que dificulta a criação e calibração de um bom modelo para esta região. Parte dos fatores obtidos pelo modelo foi utilizados para indicar áreas susceptíveis à expansão deste cultivo por meio de um índice desenvolvido com a técnica AHP (*Analytic Hierarchy Process*), considerando variáveis ambientais, de infraestrutura, relevo, áreas protegidas e categorias fundiárias presentes nas regiões de Santarém e Novo Progresso. É importante ressaltar que as regiões analisadas apresentam diferentes estágios e históricos de ocupação, e por essa razão foram escolhidas para esse estudo. Na região de Santarém, o cultivo da soja encontra-se em um estágio de consolidação, mais avançado do que na região de Novo Progresso, devido às condições ambientais favoráveis, localização (proximidades com o Rio Amazonas) e, em especial, devido ao início das operações do terminal da Cargill em 2003. A introdução da soja em Novo Progresso é mais recente e ainda está em vias de consolidação, principalmente após a conclusão da pavimentação da BR – 163, que facilitou o acesso destas áreas aos portos graneleiros de Miritituba, construídos após 2014.

Nestas regiões, os sistemas agrários relacionados com o cultivo da soja, concorrem com os sistemas camponeses (SANTOS, 2020), estando muitas vezes em situações de disputa pela terra, quase sempre em condições de desigualdade. A identificação de fatores e de áreas susceptíveis à expansão da soja é um passo importante no planejamento e

ordenamento territorial dessas regiões. São áreas que apresentam condições potenciais para que ocorram conflitos entre as formas de produzir exógenas, que utilizam o modelo químico-mecânico-genético e os modos de produzir baseados no conhecimento do bioma (FOLHES; FERNANDES, 2022). Com esse indicador é possível identificar áreas com maior potencial para o cultivo da soja contrapondo-as com os modos de produzir locais para gerar informações que subsidiem a criação de políticas e que possibilitem controlar e assegurar o acesso à terra, em especial às populações locais, economicamente e socialmente mais vulneráveis, e aos seus modos de produzir.

1.1 Objetivo geral

Avaliar a expansão do cultivo da soja na Região de Santarém (Santarém, Belterra e Mojuí dos Campos) e na Região de Novo Progresso (Novo Progresso, Altamira e Itaituba), do período de 2000 a 2020, a partir de um modelo de regressão logística e de um indicador de suscetibilidade à expansão da soja.

1.1.1 Objetivos específicos

1. Produzir e analisar indicadores de tempo de viagem (TV), valorização da terra (IVT) e desmatamento, utilizados como *proxies* para infraestrutura logística e mercado de terras, para a região de Santarém e Novo Progresso, para o período de 2004 a 2020;
2. Analisar os fatores associados à expansão da soja por meio de um modelo de regressão logística para a região de Santarém;
3. Produzir e analisar um indicador de suscetibilidade à expansão da soja para as regiões de Santarém e Novo Progresso.
4. Analisar os indicadores IVT, desmatamento, TV e de suscetibilidade à expansão da soja das duas áreas de estudo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O avanço da fronteira agrícola na Amazônia

Quando se discute o processo de expansão das atividades agrícolas ligadas ao agronegócio na Amazônia, normalmente costuma-se inseri-lo no processo de expansão da fronteira agrícola (MARTINS, 1996). De acordo com uma interpretação de Sauer (2018) sobre o conceito de fronteira agrícola apresentado por Martins (1996), a fronteira da Amazônia apresenta um movimento não espontâneo de expansão das atividades agropecuárias sobre regiões classificadas como “desocupadas” ou “pouco ocupadas”, incentivado por recursos governamentais e políticas públicas nas décadas de 1960 e 1970. Contudo, a partir da segunda metade da década de 1980, verifica-se uma redução nos incentivos fiscais federais e um aumento da parcela do investimento privado (MACHADO, 2002).

Segundo Becker (2010), somente a partir do final da década de 1960 se iniciou o planejamento regional por parte do governo federal para a ocupação da Amazônia. Entre os anos 1970 e 1980 ocorreu a migração de famílias oriundas principalmente da região sul e nordeste, para a região amazônica, impulsionada por políticas de incentivos fiscais e programas de desapropriação e distribuição de faixas de terras às margens das estradas federais (BERCKER, 2005; SAUER; MÉSZARÓS, 2017). O custo baixo da terra e os investimentos federais para a implantação de novas estradas, como a BR-163 e a BR-230 (rodovia Transamazônica), proporcionaram condições ideais para a expansão da fronteira agrícola na Amazônia (GALEANO, 2012).

Em meados da década de 1980, ocorre o esgotamento do modelo nacional-desenvolvimentista, no qual o Estado desempenha um importante papel nos assuntos econômicos e na política de desenvolvimento regional (SANTOS, 2020; BERCKER, 2009). Por isso, observa-se que entre as décadas de 1980 e 1990, a ocupação da Amazônia passa a ser induzida não apenas pelo Estado, contando também com a participação do capital privado representados por madeireiros, pecuaristas e agricultores de larga escala (MACHADO, 2002; BECKER, 2005).

A partir da década de 1980 também é observada uma intensificação do processo de desmatamento na Amazônia. Os incentivos fiscais fornecidos pelo governo federal visando a implantação de projetos agropecuários para a ocupação da região sul do Estado

do Pará e a região norte do estado do Mato Grosso, bem como a construção de rodovias, foram os principais fatores que provocaram a supressão da cobertura florestal neste período (PORTO, 2001). Este processo despertou a atenção internacional para a falta de políticas públicas por parte do governo federal para coibir o desmatamento na região e das políticas de ocupação da Amazônia vigentes à época. Em resposta, o governo federal criou o Programa Nossa Natureza em 1988, que resultou na criação do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) em 1989. Ainda nesse período, foi criado Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal (PRODES) pelo INPE, o projeto tem por objetivo monitorar a partir de imagens de satélites o desmatamento por corte raso em toda a área da Amazônia Legal (AML). Desde 1988 o PRODES estima taxas anuais de desmatamento para toda a região da AML (INPE, 2019).

O aumento do desmatamento na década de 1980 também faz emergir movimentos de resistência das populações locais, com destaque para a criação do Conselho Nacional dos Seringueiros, suas demandas e propostas para uma forma de desenvolvimento alternativo são resultado dos conflitos que ocorreram entre a década de 1970 e 1978 (ALLEGRETTI, 2008). Em meio a esse contexto, são criadas reservas extrativistas, unidades de conservação e também surge uma preocupação com a forma de desenvolvimento voltada para as iniciativas e potencialidades locais, valorizando os saberes tradicionais (SANTOS, 2020; BECKER, 2009).

No final da década de 90 e início dos anos 2000, a fronteira de expansão torna-se mais localizada e concentrada em algumas regiões, a exemplo da região do extremo norte do estado do Mato Grosso, região sudeste do Pará e também às margens da rodovia BR 163 localizadas na região Sudoeste do Pará. Nesse período, também ocorre a inserção do cultivo de soja na Amazônia, sobretudo na região central do Mato Grosso e estado do Pará, inicialmente em Santarém (BRANDÃO; REZENDE; MARQUES, 2005; SAUER, 2018). A infraestrutura precária, com um alto número de trechos rodoviários sem pavimentação e a ausência de portos ou silos graneleiros, era o principal obstáculo para a expansão da produção de *commodities* agrícolas na Amazônia (BALLETTI, 2014). Contudo, esse cenário começa a mudar graças a uma série de programas federais voltados a melhorar e ampliar a infraestrutura para o escoamento da soja na região, iniciando com

o programa Avança Brasil no início dos anos 2000 e, posteriormente com o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) (CARDOSO, 2008).

Entre os anos de 2001 e 2004 observa-se um crescimento expressivo na taxa de desmatamento medida pelo PRODES, sendo que no ano de 2004 é registrada a segunda maior taxa de desmatamento (27.772 km²). Em 2004, os estados que apresentaram as maiores taxas nesse período foram Mato Grosso (11.814 km²) e Pará (8.870 km²) (PRODES, 2022). Embora as altas de taxa de desmatamento verificadas no início dos anos 2000 possam ser atribuídas a uma série de atividades agropecuárias desenvolvidas na região, a expansão da soja verificada nesse período foi um fator importante influenciando de forma direta ou indireta na conversão de áreas florestais, assim como na de antigas pastagens e áreas de vegetação secundária, nos estados do Mato Grosso e do Pará (SAUER, 2018; GOLLNOW, 2018).

Após o pico em 2004, a taxa de desmatamento apresenta uma queda expressiva até o ano de 2012, que apresenta a menor taxa de desmatamento medida na série histórica (4.600 km²) (PRODES, 2022). Alguns fatores podem explicar essas taxas decrescentes, eles são comumente associados à implementação de novas políticas ambientais, como é o caso da criação do Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal – PPCDAM (ASSUNÇÃO; GANDOUR; ROCHA, 2015), e também de compromissos firmados pelas entidades que compõem a cadeia produtiva da soja, como a moratória da soja (AMARAL et al., 2021) ou o TAC (Termo de Ajuste de Conduta) da carne (IMAZON, 2018). Em consonância com esses fatores, Nepstad (2017), apresenta algumas hipóteses para o decréscimo: *(i)* os produtores rurais passaram a associar o desmatamento ao risco de perda de acesso ao mercado e crédito, além do iminente perigo de sofrerem multas ou até mesmo indiciamento criminal *(ii)* alguns produtores rurais começaram a obter benefícios como, acesso a novas linhas de créditos pela renúncia ao desmatamento, certificações internacionais de responsabilidade ambiental e pagamento por serviços ecossistêmicos; *(iii)* o desmatamento incentivado pela especulação fundiária pode ter se reduzido no período em decorrência de expansão de áreas protegidas.

Contudo, a partir do ano de 2018, passa-se a observar um aumento expressivo na taxa do desmatamento (PRODES, 2021). Grande parte desse aumento pode ter relação direta com a diminuição da fiscalização por parte do governo federal sob a figura do IBAMA, a

descontinuação do PPCDAM, desestruturação de instituições responsáveis pelo monitoramento e controle do desmatamento, bem como as alterações no código florestal brasileiro (MESSIAS, 2021; AGAPITO; MIRANDA; JANUÁRIO, 2022). Um outro elemento importante são os sinais dados pelo governo federal da não punição de atividades ilícitas como a mineração e extração de madeira em terras indígenas (RORATO et al., 2020) e em Unidades de Conservação (OLIVEIRA, 2019)

2.2 A expansão da soja na Amazônia

Apesar da taxa de desmatamento observada nos últimos anos apresentar uma tendência de aumento, como apresentado na Seção 2.1, pouco desse desmatamento tem sido atribuído à expansão da soja. Atualmente, a maior parte das áreas convertidas para soja na Amazônia vem de áreas de pastagem (SONG et al., 2021), principalmente após a moratória da soja (GOLLNOW, 2018).

Em relação ao histórico da soja no Brasil, foi em 1882 que chegou ao Brasil o primeiro lote de material genético de soja, introduzido e testado no estado da Bahia. O material trazido era oriundo dos Estados Unidos, e apresentava baixa adaptação às condições climáticas de regiões de baixas latitudes, como o estado da Bahia, e não houve êxito em cultivá-lo (DALL'AGNOL, 2011). O êxito do cultivo da soja ocorre a partir da década de 1940, quando ela passa a ser semeada no estado do Rio Grande do Sul, que apresenta condições climáticas favoráveis para o cultivo das variedades de soja americanas utilizadas à época. Na década de 1960 a política de incentivo ao cultivo do trigo nos estados do Rio Grande do Sul e do Paraná foi responsável por aumentar o estímulo à produção da soja, uma vez que a soja podia ser cultivada no verão em um esquema de rotação de culturas e era possível utilizar o mesmo maquinário e mão de obra, utilizados no cultivo do trigo realizado no inverno (DALL'AGNOL, 2016).

A partir da década de 1970 a soja gradativamente se tornou a principal lavoura do agronegócio brasileiro, no início da década foram produzidas 1,5 milhões de toneladas. Este número passou para 15 milhões no ano de 1979, crescendo e se consolidando como a principal lavoura do agronegócio brasileiro, passando de dois milhões de toneladas em 1970, para aproximadamente 15 milhões de toneladas, na safra de 1979/1980. O alto preço da soja no mercado internacional na década de 1970 e geada ocorrida em 1975 que dizimou os cafezais localizados no estado do Paraná, foram os principais impulsionadores

da expansão do cultivo da soja neste período, que se concentrou na região Sul (EMBRAPA, 1987).

Contudo, os produtores sulistas enfrentavam dificuldades em ampliar a área de cultivo devido ao elevado preço da terra, de forma que muitos deles venderam suas terras na região sul para comprar áreas maiores na região Centro-Oeste, onde a terra era mais barata (DALL'AGNOL, 2016). À época, as variedades de soja cultivadas não apresentavam boas adaptações às condições do cerrado, o que tornava urgente o desenvolvimento de variedades de soja, que pudessem ser cultivadas em climas de latitudes mais baixas. Neste contexto, pesquisadores brasileiros pertencentes à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), fundada em 1975 com o objetivo de desenvolver tecnologias para produção de soja adaptadas às condições tropicais com baixas latitudes, desenvolvem cultivares que conseguem se adaptar às condições do cerrado, além de técnicas de correção de solo (DALL'AGNOL, 2016; CUIABANO, 2019).

Com isso, a partir do final da década de 1970 e início da década de 1980, é iniciado o processo de expansão da soja no bioma Cerrado. Em 1980, a área de soja plantada na região Centro-Oeste era de cerca de 1,249 milhões de hectares. Ocorre um pico em 1988 quando são plantados 4 quatro milhões de hectares de soja, e no ano de 1989 são cultivados 3,7 milhões de hectares. Outro fato importante, é que a região Centro-Oeste ultrapassa a região Sul em relação à quantidade de soja produzida no ano de 1990 (CONAB, 2021). A partir de 1990, a produção de soja na região Centro-Oeste apresenta um grande crescimento, estimulado, sobretudo pelos avanços das pesquisas agrícolas desenvolvidas pela EMBRAPA, do início dos anos 2000 até o presente momento. A região é a responsável pela maior parcela da produção de soja do país (MARTINELLI, 2017; CONAB, 2021). No levantamento realizado pela CONAB para a safra 2021/2022, 57% da soja produzida no Brasil era oriunda do Centro-Oeste.

No fim da década de 1990, o cultivo da soja oriunda da região Centro-Oeste, se expande para o Bioma Amazônia. Costa (2012) apresenta alguns fatores que favoreceram a expansão da soja em direção à Amazônia: (i) aumento da demanda internacional da soja; (ii) avanço das pesquisas agrícolas voltadas à melhoria das variedades de soja, com estudos realizadas em Rondônia em 1980 e em 1990 no Pará; (iii) implantação de

infraestrutura logística voltada ao escoamento e armazenagem da soja pelo governo federal e iniciativa privada.

A produção de soja na região norte é a menor de todas as regiões brasileiras, contudo, entre os anos de 2000 e 2010 a produção realizada na região cresceu aproximadamente 700%, bem acima da média nacional e das demais regiões. Em 2000 foram produzidas 217.000 toneladas de soja e em 2010 1,961 milhões de toneladas (CONAB, 2021). Em âmbito mundial, a produção da soja foi uma das atividades agrícolas que apresentou um crescimento expressivo nas últimas décadas (DALL'AGNOL; LAZAROTTO; HIRAKURI, 2010).

A soja demanda um sistema intensivo para que a produção seja realizada em larga escala, necessitando, portanto, de um conjunto de técnicas agrícolas, maquinário, condições ambientais, logísticas e fundiárias para geração de lucro, superando os altos custos de produção (FREY et al, 2018; SCHIELEIN et al., 2021; OLIVEIRA; SANTANA; HOMMA, 2013). Em relação às condições ambientais que favorecem o plantio da soja se destacam as exigências hídricas, térmicas e as características do solo para que a soja possa se desenvolver (EMBRAPA, 2014). Como a colheita da soja é realizada utilizando maquinário, é importante que o cultivo se desenvolva em áreas planas e com solos pouco pedregosos, características que favorecem a mecanização do cultivo (PACHECO et al., 2001). Boas condições de infraestrutura logística que garantam fácil acesso a silos e portos, ou mesmo ter essas instalações localizadas próximas de onde é cultivada a soja, são fatores que auxiliam os produtores a reduzirem custos de produção, garantindo a eles vantagens competitivas (SCHIELEIN et al., 2021; OLIVEIRA; SANTANA; HOMMA, 2013).

Um fator importante para o cultivo da soja é a disponibilidade de grandes extensões de terra que devem apresentar fatores que favoreçam o cultivo de soja. Normalmente essas terras apresentam preços mais altos (BRANDÃO; REZENDE; MARQUES, 2005). O valor das terras varia de acordo com a demanda, que por sua vez está diretamente relacionada com a expectativa de ganhos com a produção. Uma explicação para o alto valor das terras que se adequam ao cultivo da soja na região se deve à crescente demanda associada à alta lucratividade desta atividade (REYDON; PLATA, 2006). Além disso,

outro fator que pode explicar o alto valor destas terras, é o processo de especulação fundiária.

Conforme a produção da soja foi se intensificando na região Centro-Oeste, o complexo agrícola que depende da exportação do grão sobrecarrega a infraestrutura logística regional. Até meados dos anos 2000, a maioria dos grãos produzidos na região era transportado por longas distâncias até os portos localizados nas regiões Sul e Sudeste, principalmente os portos de Santos e Paranaguá, o que gerava altos custos para os produtores rurais (ABEL, 2021). Frente a esse cenário, houve uma grande pressão do setor do agronegócio para que fossem criados corredores logísticos para o escoamento da produção pela região Amazônia, mais próximos das áreas de cultivo, contando com uma vasta rede hidroviária (SAUER, 2018). Com isso, iniciam-se a partir da década de 2000, iniciativas públicas (como o programa PAC) e privadas (investimento de empresas como a Cargill), para a pavimentação de estradas estratégicas, como a BR - 163, que liga a região Centro-Oeste até os novos portos fluviais que viriam a se instalar na Amazônia, iniciando com o porto da Cargill no município de Santarém em 2003 (OGITA; RESENDE; ASSIS, 2019).

A abertura dos novos corredores logísticos, sobretudo a abertura de novos portos na região Norte, ocorre dentro do escopo no projeto Arco Norte, que é definido pelo Ministério da Infraestrutura (2016) como um Plano estratégico que compreende portos ou estações de transbordos dos estados de Rondônia (RO), Amazonas (AM), Pará (PA), Amapá (AP) e Maranhão (MA). A abertura desses novos portos reduziu drasticamente o custo de transporte da produção de soja proveniente do Centro-Oeste. Em 2020 o custo de transporte de 1 tonelada de soja oriunda do município de Sorriso no Mato Grosso até o porto de Miritituba, no município de Itaituba, custava R\$ 190,00, enquanto que o transporte para o porto de Santos custava R\$ 320,00 (ESTADAO, 2021). A construção dos novos corredores logísticos também estimulou a expansão do cultivo da soja em três principais polos no estado do Pará: as regiões de Santarém, Paragominas e Santana do Araguaia (SAUER, 2018).

A expansão da soja no território Amazônico no início dos anos 2000 provocou grandes impactos da cobertura florestal, contribuindo significativamente para as altas taxas de desmatamento verificadas neste período (GIBBS et al., 2015). Após o acordo da

moratória da soja, é observada uma tendência de diminuição da conversão direta da cobertura florestal para o cultivo da soja, assim como da utilização de terras desmatadas após o marco de 2008 para o cultivo de soja (HEILMAYR et al., 2020; AMARAL et al., 2021).

Contudo, embora os desmatamentos diretos provocados pela expansão da soja possam ter apresentado uma tendência de declínio após a moratória da soja e, embora esteja em curso uma tendência de aumento de áreas de cultivo de soja em não conformidade com a moratória, como apontado pelo último relatório do acordo (ABIOVE, 2021), as mudanças indiretas provocadas por essa atividade podem ocorrer. Alguns trabalhos evidenciam as mudanças indiretas provocadas pela expansão da soja na Amazônia, porém, atribuir a expansão da soja às mudanças que ocorrem em locais distantes é bastante complexo. Contudo, três hipóteses são levantadas sobre a expansão da soja e sua contribuição indireta para desmatamento da Amazônia: (i) as novas áreas de cultivo de soja estão surgindo em antigas áreas de pastagem, e como a demanda por carne bovina se mantém, novas áreas de pastagem estão sendo abertas em áreas de fronteira de ocupação (ARIMA et al., 2011); (ii) os novos corredores logísticos criados para realizar o escoamento da soja pelos portos do arco norte podem vir a se tornar novos vetores de desmatamento, ou intensificar processos de desmatamento já existentes, como verificado no trecho da BR - 163 no Sul do Pará (TOURNEAU, 2016); (iii) os rendimentos elevados da agricultura promovem uma valorização das terras na Amazônia, assim, a medida que o valor das terras agrícolas aumenta, há um maior incentivo para desmatar (RICHARDS; WALKER; ARIMA, 2014).

Conclui-se que para compreender a expansão da soja na Amazônia é preciso identificar e analisar os fatores que influenciam esse fenômeno, considerando que tais fatores podem variar de acordo com a região analisada. Embora o desmatamento após a moratória da soja, possa não ser um fator que influencia de imediato a dinâmica da expansão da soja, ele é um fator importante que se relaciona com a terra como mercadoria, influenciando seu valor e preço (COSTA, 2012; MACUL, 2019). Portanto, esse é um fator importante nessa equação, que precisa ser mais bem explorado, quanto a sua temporalidade, juntamente com os fatores ambientais e aqueles associados à infraestrutura. Na seção seguinte é apresentada uma síntese, baseada em alguns trabalhos que analisaram a

expansão da soja, e para isso utilizaram variáveis que se relacionam com os fatores associados à expansão da soja, apresentados anteriormente nesta seção.

2.3 Fatores condicionantes da expansão da soja na Amazônia

Em um primeiro momento foi realizada uma pesquisa sobre os fatores condicionantes associados diretamente à expansão do cultivo da soja na Amazônia brasileira em trabalhos que tinham objetivo analisar esse fenômeno (FREY et al., 2018; MORTON et al., 2016; MARTINI et al., 2015; DIAZ et al., 2008; AMARAL et al., 2021). No geral, as variáveis utilizadas nos trabalhos representaram 4 categorias de fatores (Tabela 2.1) que, segundo os autores, influenciam na tomada de decisão dos produtores rurais quando investem em novas áreas de cultivo de soja dentro do contexto da expansão da fronteira agrícola da Amazônia brasileira.

Tabela 2.1- Fatores utilizados nos estudos analisados.

Fator	Justificativa
Ambiental	O cultivo da soja requer condições biofísicas específicas para se desenvolver e para que a mecanização seja viável.
Acessibilidade	O cultivo de soja requer uma boa acessibilidade à silos, unidades de processamento, portos e centros urbanos. O transporte dos grãos é complexo e envolve riscos de perdas, caso seja realizado em estradas em más condições de circulação ou por trajetos muito longos.
Políticas públicas	A legislação que regula atividades agrícolas em áreas florestais influencia diretamente na escolha do local onde será realizada a produção da soja. Produtores de soja tendem a comprar áreas de pastagem para evitar os custos e sanções pela conversão direta da floresta para o cultivo da soja. Unidades de conservação, terras indígenas, assentamentos do INCRA, áreas quilombolas também atuam como fator limitante à expansão da soja.
Preço da Terra	A dinâmica dos preços da terra pode ser um indicador para futuras expansões do cultivo da soja nas fronteiras agrícolas. Muitas vezes a conversão das áreas de floresta é realizada por atores que especulam sobre o preço futuro da terra

Fonte: Frey et al. (2018); Morton et al. (2016); Martini et al. (2015) e Diaz et al. (2008).

Nos modelos produzidos por Frey et al (2018), a variável Tempo de viagem até o silo mais próximo foi a mais importante na análise da expansão da soja. A importância da variável de tempo de viagem pode ser explicada pelo fato de que no geral, a Amazônia possui uma infraestrutura precária que encarece os custos de transporte da produção, que inviabilizar economicamente o cultivo em algumas regiões. Além disso, o transporte de máquinas agrícolas utilizadas na semeadura e na colheita pode ser prejudicado caso a malha viária não possua boas condições de tráfego (VERA-DIAZ; KAUFMANN; NEPSTAD, 2009).

As utilizações de variáveis biofísicas relacionadas ao desenvolvimento da soja são comuns em modelos que buscam analisar e identificar locais com potencial para o uso agrícola. Estas variáveis incluem informações sobre precipitação, incidência solar, temperatura, solo, dentre outras. Este tipo de variável é utilizado, sobretudo, em estudos realizados em escalas regionais ou até mesmo para todo o território amazônico (SAFANELLI et al., 2022; MORTON et al., 2016). Em estudos de menor escala, devido à baixa variabilidade destes fatores, não é verificado a presença deste tipo de variável.

Outro importante fator a ser considerado na construção de modelos para a análise da expansão da soja, é o preço da terra. De acordo com Costa (2012), o mercado de terras na Amazônia é composto por três tipos de mercadorias: Terras com mata, Terras para Lavoura e Terras de Pastagem. Inicialmente as áreas de "Florestas Originárias", que são um bem público, são convertidas no ativo genérico "Terras com Mata", que é um ativo privado e serve como "matéria prima" às outras duas formas de "terras" que compõem o mercado fundiário. Em seguida, as "Terras com Mata" são desmatadas e convertidas, de acordo com a demanda, em "Terras para Pastagens" ou "Terras para Lavoura", onde são desenvolvidas atividades agropecuárias. O preço da "Terra com Mata" é estipulado tendo como base preço dos outros dois tipos de terras, em média o preço da "Terra com Mata" corresponde a 43% do valor das "Terras para pastagem" e 23% das "Terras para Lavouras". No modelo proposto por Frey et al (2018), o preço das "Terras para Pastagem" foi a segunda variável mais importante para explicar a expansão da soja, seguido da variável de Tempo de viagem até o Silo mais próximo. Como explicado pelo autor, é observado que as novas áreas de cultivo de soja tendem a se instalar em áreas de pastagens, pois o custo da conversão é mais vantajoso.

As variáveis que representam as áreas de assentamentos, unidades de conservação e terras indígenas normalmente também são comumente utilizadas em modelos que analisam o crescimento do cultivo da soja na região amazônica. No geral, essas áreas protegidas restringem a expansão do cultivo da soja, principalmente as unidades de conservação e terras indígenas (NEPSTAD et al., 2014). Embora nos últimos anos foi possível observar movimentações políticas para a revisão de legislações associadas ao código florestal e a redução de áreas de unidades de conservação (SPAROVEK et al., 2015 ; MARTINS et al., 2014). Sobre as áreas de assentamento, apesar de serem estruturadas em pequenos lotes, é verificado que em alguns assentamentos há um comércio ilegal no qual famílias beneficiadas vendem de forma ilícita seu lote para terceiros, provocando assim a concentração de terras dentro dos projetos de assentamentos (YANAI et al., 2020).

2.4 Modelo de regressão logística

O objetivo de uma análise de regressão é buscar o modelo mais adequado para descrever a relação entre uma variável de resultado (também chamada de dependente ou resposta) e um conjunto de variáveis independentes (também chamadas de preditoras ou explicativas) (HOSMER; LAMESHOW, 2000). Uma das aplicações dos modelos de regressão é explorar a relação matemática entre padrões de uso e cobertura da terra, ou mudanças no uso e cobertura da terra, e um conjunto de variáveis explicativas.

No entanto, quando a variável dependente é binária, alguns pressupostos do modelo de mínimos quadrados, adotado na regressão linear, são violados (homoscedasticidade, linearidade e normalidade) e as estimativas podem ser inconsistentes. A regressão logística é, neste caso, a melhor ferramenta para lidar com variáveis dependentes dicotômicas, ou binárias (FERNANDES et al., 2020).

Um modelo de regressão logístico estima a probabilidade de ocorrência de um evento a partir de um conjunto de variáveis preditoras. Neste modelo de regressão, a variável dependente, normalmente, dicotômica ou binária, como a presença/ausência ou sucesso/falha (CONNOR, 2017). Quando a variável dependente é binária, assumindo valores 0 ou 1 com probabilidades p e $1 - p$, respectivamente, pode-se afirmar que Y é uma variável aleatória de Bernoulli. Um modelo de regressão logístico multivariado pode ser definido por

$$P (Y = 1) = \frac{\exp(\sum \beta X)}{1 + \exp(\sum \beta X)} \quad (2.1)$$

Onde: P representa a probabilidade de a variável dependente assumir o valor 1; X são as variáveis independentes; β são os coeficientes estimados.

A regressão logística é um modelo de regressão que tem sido, também, utilizado em análises exploratórias sobre fatores que podem estar associados a mudanças no uso e cobertura da terra, como apresentado por alguns autores (DIMOBE et al., 2022; HUU; VAN; MY, 2022; POUR; OJA, 2022).

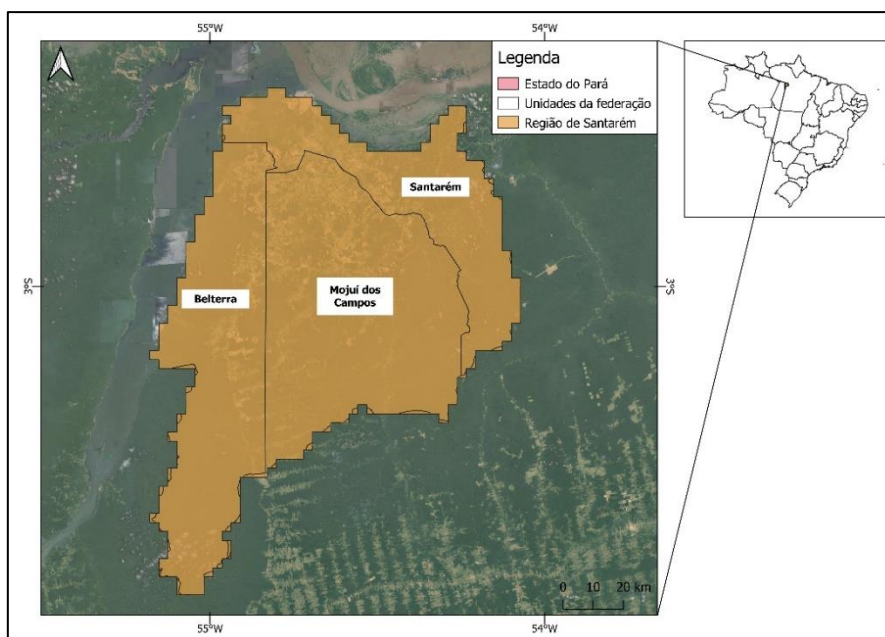
3 MATERIAL E MÉTODOS

Esse capítulo é dividido em 3 seções. Na Seção 3.1, são apresentadas e descritas as duas áreas de estudos selecionadas para este estudo. Na Seção 3.2, é feita a apresentação e descrição do o banco de dados utilizados no desenvolvimento do estudo. Na Seção 3.3, são apresentadas as etapas da metodologia do estudo.

3.1 Áreas de estudo

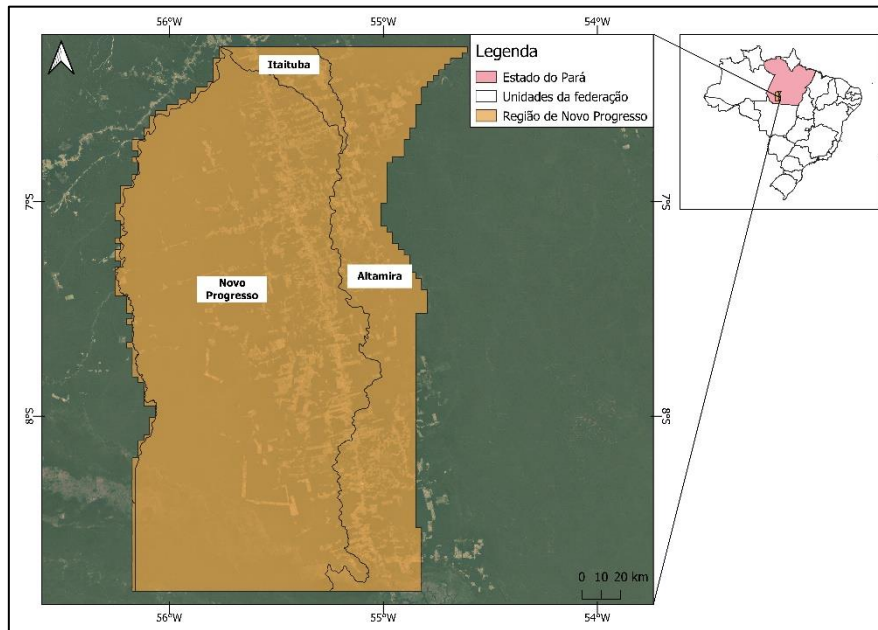
A área de estudo é composta por duas áreas:1) parte da microrregião de Santarém, composta pelos municípios de Santarém, Belterra e Mojuí dos Campos (Figura 3.1) e; 2) município de Novo Progresso e parte dos municípios de Altamira e Itaituba (Figura3.2), ambos inseridos na região sudoeste do estado do Pará. Esses municípios foram selecionados por apresentarem diferentes dinâmicas relacionadas com a expansão da soja. A região de Santarém apresenta um processo de expansão iniciado no final dos anos de 1990, enquanto a região de Novo Progresso encontra-se em fase inicial, com dinâmicas mais acentuadas após 2014. Embora o estabelecimento da soja em Novo Progresso seja mais recente, é preciso destacar que grande parte das dinâmicas de conversão da floresta iniciou na década de 2000, processo que pode estar associado à formação de estoque de terras para uso futuro na produção de grãos.

Figura 3.1 – Mapa de localização da região de Santarém.



Fonte: Produção do autor.

Figura 3.2 - Mapa de localização da região de Novo Progresso.



Fonte: Produção do autor.

Em relação à área dos municípios analisados, a região de Santarém possui 27.284 km², enquanto a região de Novo Progresso possui 38.162,002 km² (IBGE, 2021). Devido à grande extensão de área da região de Santarém, para esse estudo consideramos apenas a porção localizada na margem direita (leste) do rio Tapajós, onde se concentra o cultivo de soja (Figura 3.1).

A região de Santarém é composta por comunidades ribeirinhas com mais de 200 anos e de regiões em que a ocupação se iniciou na década de 1970, sob a influência da abertura de rodovias federais (BR-163) e incentivos fundiários e fiscais do governo federal (ALVES et al., 2010). No início dos anos 2000 ocorreram significativas mudanças no uso e cobertura da terra, quando predominavam usos associados à agricultura familiar e pecuária, convertida para a produção de soja. Tal mudança ganha força com o início das operações do porto da Cargill no município de Santarém em 2004 (SAUER, 2018). Em parte da região, a entrada dos sistemas de produção intensivos, associados ao cultivo da soja alterou drasticamente a estrutura das terras agrícolas, aumentando a concentração de terras em grandes imóveis rurais (PAULA, 2011). A produção da soja na região apresenta um crescimento expressivo a partir do ano de 2004. Neste ano, a área plantada total era de 16 mil hectares, enquanto em 2020 a área plantada passa a apresentar aproximadamente

75 mil hectares (IBGE, 2022). Atualmente o cultivo de soja se concentra principalmente na região do planalto santareno, localizado na porção central da microrregião de Santarém.

Na classificação das unidades de paisagem de produção realizada por Paula (2021) para a região de Santarém, observou-se que em 2019 na região do planalto santareno, predominou unidades de paisagens associadas à agricultura de larga escala. Em um comparativo com 2010, também foi observado que algumas áreas correspondentes a unidades de paisagens associadas à agricultura e pecuária de pequena escala foram incorporadas pela agricultura de larga escala. Este fenômeno ocorre pela venda de terras pertencentes aos pequenos agricultores que habitavam a região, ou pela conversão de áreas de pecuária e/ou cultivo de pequena escala para agricultura de larga de escalar, em especial para cultivo de soja.

O território atualmente representado pelo município de Novo Progresso teve sua ocupação intensificada entre os anos de 1978 e 1979, quando ocorreu a migração de famílias oriundas, sobretudo dos estados do Rio Grande do Sul e Mato Grosso, para o núcleo de povoamento chamado de Quilômetro 1.085 da BR-163. Em 1993, o município de Novo Progresso foi oficialmente criado, emancipando-se do município de Itaituba (IBGE 2021). Do final da década de 1990 até o ano de 2004, com a expectativa de asfaltamento da BR-163, ocorreu um grande aumento populacional ocasionando inúmeras disputas e conflitos por terra, além da presença de madeiras que se instalaram no município (ESCADA et al., 2009). Essas dinâmicas levaram a um grande aumento na taxa de desmatamento. Novo Progresso em 2004 foi apontado como um dos municípios que mais contribuiu com a taxa de desmatamento em 2004 (PRODES, 2022) apresentando 739.5km² de incremento de desmatamento entre 2003 e 2004, a 3 maior taxa dentre todos os municípios monitorados. Devido a esses acontecimentos, foi realizada intervenção da região pelo governo federal em 2004, por meio da medida provisória nº 239, de 2005, que instituiu a ALAP - Área sob Limitação Administrativa Provisória⁴. A ALAP tinha como objetivo coibir a exploração predatória dos recursos

⁴ A ALAP proibiu que fossem desenvolvidas atividades, nas áreas submetidas a limitação administrativa, atividades efetiva ou potencialmente causadores de degradação ambiental

naturais e iniciar um processo de ordenamento fundiário, a partir da criação do Distrito Florestal Sustentável da BR-163, (ALVES et al., 2008; ESCADA et al, 2009). Essa medida pode ter provocado à evasão de parte da população que migrou para a região no final dos anos de 1990. Em 2000, o município possuía 24.948 habitantes, que se reduziu para 21.598 em 2007 (IBGE, 2007).

Com a conclusão da pavimentação do trecho da BR-163 (Cuiabá-Santarém) e a implantação de Estações de Transporte de Carga (ETCs) no porto de Miritituba, (município vizinho de Itaituba) em 2014, Novo Progresso é inserido na rota de escoamento da produção de soja oriunda do estado do Mato Grosso (BARROS, 2019). De acordo com dados da pesquisa de Produção Agrícola Municipal (IBGE, 2019), entre os anos de 2006 e 2014 a área destinada ao cultivo de soja no município se manteve em 1.000 hectares. A partir de 2015 observa-se um crescimento drástico dessa área plantada, passando a 17.000 hectares em 2017, com uma pequena queda em 2019 (12.500 hectares).

3.2 Material

A Tabela 3.1 apresenta o conjunto de dados utilizados nas análises realizadas no presente trabalho, descrevendo-se o ano, fonte e algumas características de cada dado utilizado. Na última coluna é especificada a etapa do trabalho em que os dados foram utilizados.

Tabela 3.1 - Dados utilizados para a produção das variáveis.

Dado	Ano	Fonte	Resolução Espacial	Etapa
Mapa de ambientes de terra firme no Distrito Florestal Sustentável da BR-163	2015	Pinheiro, Rennó e Escada (2015)	90 metros	Modelo de regressão e indicador de suscetibilidade

continua

Tabela 3.1 – Continuação.

Uso e cobertura da terra (TerraClass)	2004 e 2020	INPE/EMBRAPA	30 metros (2004) e 10 metros (2020)	Variáveis IVT, variáveis de tempo de viagem, modelo de regressão e indicador de suscetibilidade
Dados de desmatamento (PRODES)	1988 - 2020	INPE		Modelo de regressão e indicador de suscetibilidade
Limites dos Projetos de Assentamentos	1971 - 2020	INCRA		Modelo de regressão, indicador de suscetibilidade, variáveis IVT
Malha viária	1985 - 2012	IMAZON		Variáveis de tempo de viagem e Variáveis IVT
Limites das Unidades de conservação	1974 - 2020	ICMBIO		Modelo de regressão, indicador de suscetibilidade, variáveis IVT
Limites das Terras indígenas	2020	FUNAI		Modelo de regressão, indicador de suscetibilidade, Variáveis IVT
Áreas embargadas	2002 - 2020	IBAMA		Variáveis IVT

continua

Tabela 3.1 - Conclusão.

Imóveis Rurais (CAR)	2020	SICAR		Indicador de suscetibilidade e variáveis IVT
Imóveis Rurais certificados (SIGEF)	2020	INCRA		Variáveis IVT
Modelo Digital de Elevação (TOPODATA)	2009	Valeriano (2005)	30 metros	Variáveis IVT e variáveis de tempo de viagem
Imagens Landsat 8 (OLI)	2020	USGS	30 metros	Interpretação de imagens para atualização da malha de estradas

Fonte: Produção do autor.

Para a construção de variáveis para o modelo de regressão e para a construção do indicador de suscetibilidade à expansão soja foi utilizado o dado de mapeamento dos ambientes de terra firme na área do distrito Florestal Sustentável da BR-163 produzido por Pinheiro, Rennó e Escada (2015) utilizando o descritor de terreno HAND (*Height Above the Nearest Drainage*). O algoritmo HAND é utilizado para extrair informações hidrológicas de uma área a partir das informações topográficas do MDE do SRTM. Ele estima a diferença de altura relativa entre cada ponto da grade e o ponto de drenagem mais próximo associado a um curso d'água, a fim de obter essa informação. Com base nessas medidas, o algoritmo agrupa os pontos semelhantes em zonas equiprováveis, considerando seu potencial hidrológico. No mapeamento foram definidas 4 classes, são elas: áreas de platô, vertente, transição e baixio.

Foram utilizados ainda, os dados oriundos do projeto TOPODATA que fornece informações sobre elevação e morfometria do terreno, calculado com base nos dados disponíveis do SRTM para o Brasil. Os dados fornecidos estão em a resolução espacial de 30metros, resultante da interpolação, por meio de Krigagem, dos dados originais do SRTM, que possui uma resolução espacial de 90 metros (VALERIANO, 2005). A escolha

deste dado baseou-se na em sua resolução espacial de 30 metros, semelhante a referente aos dados de uso e cobertura da terra do projeto TerraClass

Os dados de uso e cobertura utilizados foram os produzidos pelo projeto TerraClass Amazônia dos anos de 2004 e 2020 (ALMEIDA et al., 2016). O mapeamento do projeto é realizado desde o ano de 2004 e tem como objetivo qualificar os usos que são desenvolvidos em áreas desmatadas detectadas pelo PRODES. O projeto é desenvolvido em uma parceria entre o INPE e a EMBRAPA.

Em relação aos imóveis rurais, foram utilizadas as bases de dados do CAR do Sistema de Gestão Fundiária (SIGEF) ligado ao INCRA. O CAR é um registro público obrigatório para todos os imóveis rurais do país, e tem como objetivo coletar informações ambientais. A inscrição é feita por declaração, homologada pelas secretarias de meio ambiente estadual, e exige a apresentação de documentos comprobatórios de propriedade ou posse do imóvel rural, além de informações georreferenciadas do perímetro do imóvel. Os dados do INCRA são provenientes de imóveis certificados pelo órgão e disponíveis publicamente no SIGEF.

Os dados de estradas vicinais e oficiais para toda Amazônia é disponibilizado Imazon (Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia). O instituto realizou o mapeamento de todas as estradas na região amazônica até 2012, a partir de interpretação visual de composições de imagens criadas para realçar o traçado viário (BRANDÃO JUNIOR; SOUZA JUNIOR, 2006). Posteriormente, foi realizada a atualização da malha viária nas duas áreas de estudo para o ano de 2020.

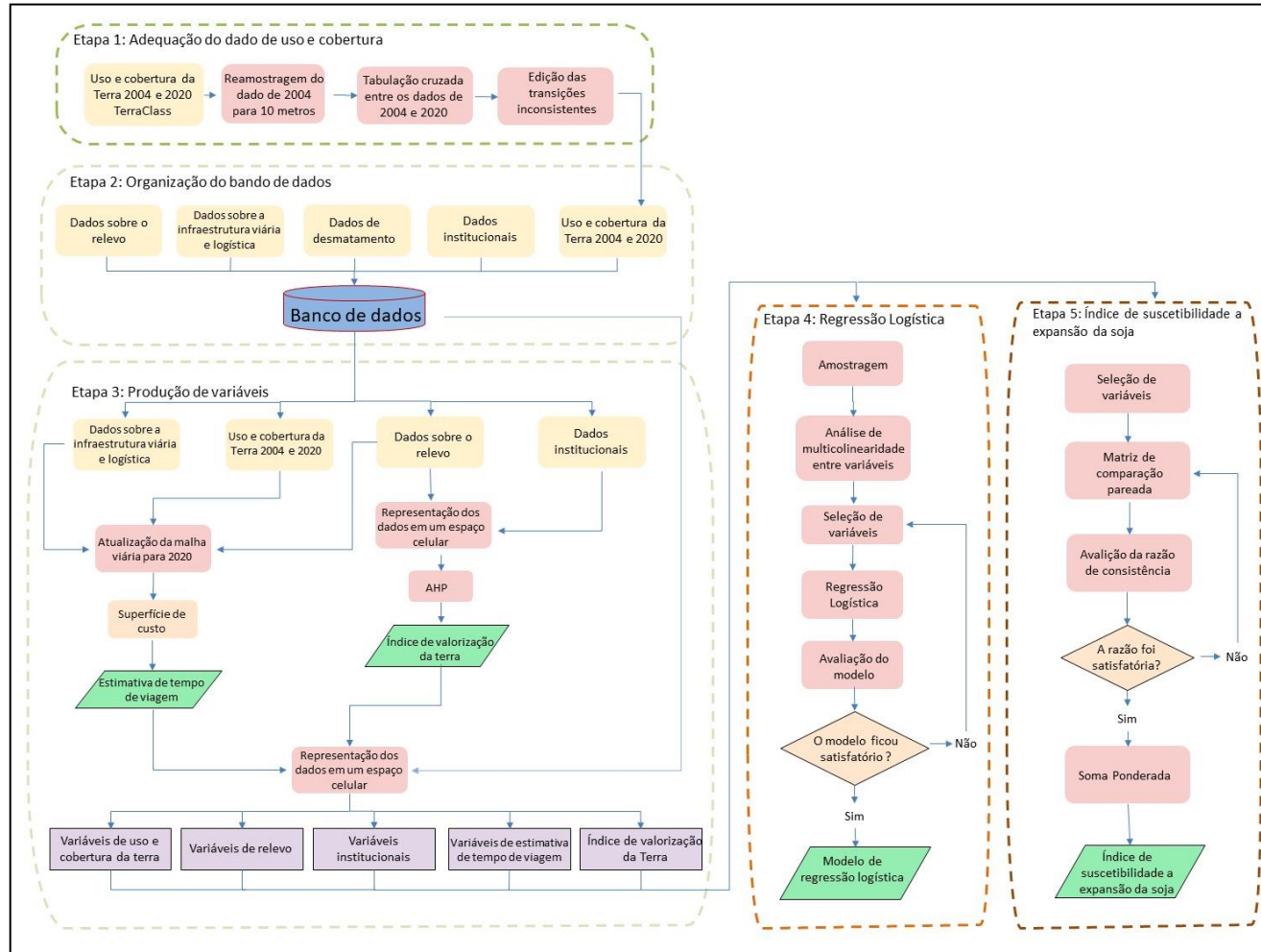
As imagens Landsat 8 para as áreas de estudo correspondem a um mosaico anual para o ano de 2020 produzido na plataforma Google Earth Engine. Devido à alta cobertura de nuvens, não foi possível encontrar uma cena com baixa cobertura de nuvens nas duas áreas. Foram selecionadas as bandas 6 (infravermelho médio), 5 (infravermelho próximo) e 4 (vermelho) do sensor OLI.

3.3 Métodos

A metodologia proposta se divide em 5 etapas (Figura 3.3). Na etapa 1 é realizada a compatibilização e adequação dos dados de uso e cobertura da terra dos anos de 2004 e 2020 do TerraClass. Embora os dados sejam provenientes da mesma fonte, esses

procedimentos foram necessários devido a problemas de deslocamento identificados entre as feições dos dois mapas. Foi realizado o cruzamento dos mapas de uso e cobertura da terra obtendo-se uma matriz com as transições das classes para o período de 2004 a 2020, observando-se a conversão de classes de uso da terra para soja e a conversão de áreas de florestas para outros usos. Em seguida (Etapa 2), os dados de uso e cobertura da terra, juntamente com outros dados espaciais provenientes de diferentes fontes são inseridos no banco de dados espacial. Na etapa 3, uma grade celular de tamanho 3X3 km é criada para representar as variáveis utilizadas nas etapas seguintes. Nessa etapa, são criados os indicadores de Tempo de Viagem (TV) e Índice de Valorização da Terra (TV e IVT). Na etapa 4 é desenvolvido o modelo de regressão logística, com as variáveis e indicadores obtidos na etapa 3. Na etapa 5 é construído o índice de suscetibilidade a expansão da soja para as regiões de Santarém e Novo Progresso. Nas seções seguintes essas etapas serão detalhadas.

Figura 3.3 – Etapas metodológicas do estudo.



Fonte: Produção do autor.

3.3.1 Adequação do dado de uso e cobertura da terra do projeto TerraClass

Os dados de uso e cobertura da terra de 2004 e 2020 possuem algumas apresentam diferenças em relação aos produtos (imagens provenientes de diferentes sensores) utilizados na classificação, com características espectrais e espaciais diferentes. Enquanto a classificação realizada no ano de 2004 tem como base imagens TM/Landsat 5 com resolução espacial de 30 metros, a classificação para o ano de 2020 se baseou em imagens MSI/Sentinel 2e possui uma resolução espacial de 10 metros.

Ao realizar o cruzamento entre os dados, com o objetivo de obter as transições entre classes de uso e cobertura da terra ocorridas no período, observou-se a existência de transições inconsistentes, entendidas no presente trabalho como aquelas que não aconteceriam considerando a base de dados utilizada e as definições das classes (ex: áreas de pastagens transicionando para floresta primária). Este problema pode estar atrelado a erros de geometria que derivam da utilização de sensores com características diferentes nas classificações, além da própria resolução dos dados não serem coincidentes.

Como forma de eliminar as transições inconsistentes, visando dar uma maior precisão às análises derivadas da combinação desses dados, foram adotados alguns procedimentos. Inicialmente o dado do ano de 2004 foi reamostrado para 10 metros utilizando o interpolador *vizinho mais próximo*, pois este não altera o valor atribuído aos pixels. Em seguida, foi realizado o cruzamento entre os dados dos dois anos para se obter as transições entre as classes de uso e cobertura da terra. Ao fim desse processo foram gerados dois resultados: (i) Um dado matricial em que cada valor de pixel é associado a uma classe transição; (ii) Uma tabela descrevendo quais transições estão associadas a cada valor de pixel, a Tabela 3.2 apresenta alguns exemplos das transições encontradas.

Tabela 3.2 - Exemplo de transições possíveis entre classes de uso e cobertura da terra.

Valor da classe de transição	Classe em 2004	Classe em 2020
1	Floresta	Floresta
2	Vegetação secundária	Floresta
3	Floresta	Vegetação secundária
4	Vegetação secundária	Vegetação secundária
5	Pastagem arbustiva	Floresta

Fonte: Produção do autor.

Embora após a reamostragem, mesmo com os dados com a mesma resolução espacial (10 metros), ainda foi possível observar algumas transições inconsistentes, como as associadas aos valores 2 e 5 na Tabela 3.2. Desta forma, se fez necessário editar o dado para que todas as transições entre classes fossem válidas. Nesta etapa a classe presente no ano de 2004 foi usada como base para decidir se a transição era consistente ou não. Caso a transição não seja inconsistente, a classe do ano 2020 é mantida, caso contrário a classe do ano de 2004 será mantida em 2020, de forma a obter-se apenas transições consistentes no período. O conjunto de regras definido para determinar se uma transição é consistente ou não é apresentado a seguir:

- a) As áreas classificadas como *Não Observadas* em 2004 e/ou em 2020 são excluídas da análise. Nesses locais a classificação foi comprometida devido à presença de nuvens, o que torna inviável a atribuição de classes e de transições nesses locais;
- b) Nenhuma classe do ano de 2004 deve transicionar para a classe *Floresta* em 2020. Nas transições em que ocorre esta dinâmica, mantem-se a classe de 2004 para o ano de 2020;
- c) Apenas as áreas correspondentes às classes de *Pastagens e Floresta*, classificadas em 2004, podem transicionar para a classe *Vegetação Secundária* em 2020. Caso seja apresentada essa transição com outras classes, são mantidas as classes originais do ano de 2004;

- d) Áreas classificadas como *Agricultura Temporária* em 2004, definidas no presente trabalho como áreas de cultivo de grãos, não transicionam para nenhuma outra classe em 2020. Considerando que a conversão de uma área para o cultivo da soja envolve custos muito altos, torna-se difícil a alteração do uso. De acordo com observações de campo realizadas por Santos (2020), mesmo com a redução do preço da soja em alguns anos do período estudado, as terras não são convertidas para outros usos. Quando o proprietário dessas terras não pode arcar com os custos da produção, em geral, é feito o arrendamento para outros produtores de grãos e não ocorre a conversão para outros usos;
- e) As áreas da classe *Não floresta* no ano de 2004 não transicionam para nenhuma outra classe em 2020. Nas transições inválidas envolvendo a classe de *Não Floresta*, essa classe é mantida para o ano de 2020. Essas áreas fazem parte da máscara do PRODES e não são alvos do mapeamento de desmatamento realizado pelo projeto;
- f) As áreas urbanizadas classificadas em 2004 não devem transicionar para nenhuma classe em 2020. Tal decisão se baseia no fato de que uma vez que uma região é urbanizada, ela tende a não ter seu uso alterado para outras classes;
- g) As áreas de mineração classificadas em 2004 não devem transicionar para nenhuma outra classe em 2020. A decisão para a elaboração desta regra se baseia na suposição de que no intervalo de tempo de 16 anos entre as classificações, as áreas de mineração que foram abandonadas não teriam tempo suficiente para se recuperar e serem convertidas para usos agropecuários ou para vegetação secundária;
- h) As áreas classificadas como *Outros Usos* em 2004 foram mantidas em 2020. O dado de 2020 não possui essa classe, dificultando a análise de transição e, por isso, optou-se por manter essa classe no ano de 2020;
- i) As áreas de hidrografia classificadas em 2004 não devem transicionar para nenhuma classe em 2020. Apesar da possibilidade de ocorrerem mudanças na lâmina d'água, devido à reamostragem realizada no dado de 2004 e do deslocamento entre as classificações, não é possível inferir com precisão se a transição ocorreu ou provocada pelo deslocamento entre os dados. Quando há

algum tipo de transição envolvendo essa classe, prevalece a classe *Hidrografia* de 2004.

Na Tabela 3.3, são apresentados alguns exemplos de transições que se enquadraram nas regras apresentadas anteriormente.

Tabela 3.3 - Exemplo das situações em que as edições foram realizadas para algumas transições inconsistentes observadas na região de Santarém de acordo com as regras estabelecidas.

Regra	Classe em 2004	Classe em 2020	Classe adotada para 2020
b	Pastagem	Floresta	Pastagem
c/f	Área Urbanizada	Vegetação Secundária	Área urbanizada
d	Agricultura Temporária	Vegetação Secundária	Agricultura temporária
e	Não Floresta	Agricultura Temporária	Não Floresta
g	Mineração	Pastagem	Mineração
h	Outros Usos	Vegetação Secundária	Outros usos
i	Hidrografia	Vegetação Secundária	Hidrografia

Fonte: Produção do autor.

3.3.2 Produção de variáveis

A escolha das variáveis baseou-se na revisão de literatura sobre fatores condicionantes da expansão da soja na Amazônia, sintetizados na Tabela 2.1. As variáveis analisadas nesse trabalho foram construídas a partir do cálculo da proporção de área ou da mediana dos valores das variáveis dentro de células com resolução espacial de 3 por 3 km, elas são apresentadas na Tabela 3.4. Na Tabela 3.4, o campo denominado “premissa” descreve as associações teóricas estabelecidas entre as variáveis selecionadas e o processo de

expansão da soja. As variáveis baseadas na proporção da área da célula foram calculadas utilizando a ferramenta de preenchimento de células presente no software TerraView, enquanto que as variáveis baseadas na mediana do valor na célula foram produzidas com ferramenta de estatística zonal presente no software Qgis. Algumas variáveis passaram por processamentos mais complexos, foram elas: a estimativa de Tempo de Viagem(TV) e o Índice de Valorização da Terra (ITV). A classe *Agricultura Temporária*, presente na classificação do projeto Terra Class, foi utilizada como *proxy* para representar as áreas de cultivo de soja, uma vez que a soja é a cultura temporária mais predominante na região de Santarém (IBGE, 2020).

Nas Seções 3.3.2.1 e 3.3.2.2 o processo de produção dessas variáveis é detalhado. A classe *Agricultura Temporária*.

Tabela 3.4 – Variáveis analisadas e associadas ao processo de expansão da soja.

Fator	Variável	Premissa	Fonte
Variável dependente	Ausência e presença de áreas de expansão do cultivo de soja verificadas entre os anos de 2004 e 2020 na célula	Variável dependente utilizada no modelo de regressão logístico para a Região de Santarém e análises de suscetibilidade à expansão da soja realizadas na região de Santarém e Novo Progresso	TerraClass (2020)
Relevo	Proporção (%) de áreas de platô na célula	Os platôs são áreas mais altas e planas. Apresentam condições favoráveis para a expansão do cultivo de soja, pois favorece a mecanização.	Pinheiro, Rennó e Escada (2015)
Uso e cobertura da terra	Proporção (%) de área de floresta na célula em 2020	As áreas de florestas são impeditivas para a expansão da soja, devido ao alto custo para remover da cobertura florestal e ao risco de embargos comerciais.	TerraClass 2004 e 2020
	Diferença da proporção de cobertura florestal entre 2004 e 2020	A soja tende a se expandir em locais de supressão florestal entre os anos de 2004 e 2020, especialmente anterior a 2008, antes da moratória da soja.	
	Proporção (%) de área de vegetação secundária na célula em 2020	As áreas de vegetação secundária tendem a ser convertidas direta ou indiretamente para áreas de cultivo de soja.	

continua

Tabela 3.4 – Continuação.

Uso e cobertura da terra	Diferença da proporção de vegetação secundária entre 2004 e 2020	A soja tende a se expandir em locais onde houve supressão de vegetação secundária entre os anos de 2004 e 2020. São áreas abandonadas ou sem produção.	TerraClass 2004 e 2020
	Proporção (%) de área de pastagem na célula em 2020	Áreas de pastagem apresentam características que favorecem a conversão para o cultivo de soja.	
	Diferença da proporção de área de pastagem entre 2004 e 2020	A soja pode tende a se expandirem locais com maior redução de áreas de pastagens.	
	Proporção (%) de áreas desmatadas até o ano de 2007 na célula	As áreas de cultivo de soja tendem a se expandir, principalmente, em áreas desmatadas antes de 2008, quando passa a vigorar a moratória da soja	PRODES (2020)
	Proporção (%) de áreas desmatadas após o ano de 2008 na célula	As áreas de florestas tendem a ser um impeditivo para a expansão da soja, devido à moratória da soja	
Institucional	Proporção (%) de áreas de assentamentos na célula em 2004	Áreas de assentamentos criadas por meio de política de reforma agrária em que predominam atividades agrícolas de pequena escala, tendem a ter associação negativa com a soja.	INCRA (2019)
	Diferença da proporção de áreas de assentamento entre 2004 e 2020	A criação de novas áreas de assentamento pelo INCRA restringe a expansão da soja na região	
	Proporção (%) de áreas de unidades de conservação na	Unidades de conservação restringem o acesso à terra à produção de larga escala e, por consequência, à expansão da soja.	ICMBIO (2019)
	Proporção (%) de áreas de terras indígenas na célula	Terras indígenas são áreas restritas que proíbem o acesso à terra às populações não indígenas e, por consequência, restringem a expansão da soja	FUNAI

continua

Tabela 3.4 – Continuação.

Infraestrutura e logística	Mediana do tempo de viagem até portos na célula em 2004 e 2020 no período seco	As áreas de cultivo de soja tendem a se expandir em locais com boa infraestrutura de transporte e acesso às unidades de armazenamento e de escoamento da produção, no período seco.	Elaborada pelo autor
	Diferença da mediana do tempo de viagem até porto entre 2004 e 2020 no período seco	As áreas de cultivo de soja tendem a se expandirem em regiões onde o tempo de deslocamento até os portos diminuiu, em virtude da ampliação da malha viária principal ou vicinal no período seco.	
	Mediana do tempo de viagem até portos na célula em 2004 e 2020 no período chuvoso	As áreas de cultivo de soja tendem a se localizarem em locais com boa acessibilidade às unidades de armazenamento e de escoamento da produção no período chuvoso.	
	Diferença da mediana do tempo de viagem até porto entre 2004 e 2020 no período chuvoso	As áreas de cultivo de soja tendem se expandirem em regiões onde o tempo de deslocamento até os portos diminuiu no período analisado, em virtude da ampliação da malha viária principal ou vicinal no período chuvoso.	
	Mediana da distância até a via vicinal mais próxima na célula em 2004 e 2020	As áreas de cultivo de soja tendem a se expandirem regiões próximas a vias vicinais.	Imazon 2012 e atualização realizada pelo autor
	Diferença da mediana da distância até a via vicinal mais próxima na célula entre 2004 e 2020	As áreas de cultivo de soja tendem a se expandirem regiões onde a malha de vias vicinais se ampliou no período de 2004 a 2020.	
Mediana da distância até a rodovia estadual ou federal mais próxima na célula	As áreas de cultivo de soja tendem a se expandirem áreas próximas às rodovias principais, principais rotas de acesso aos portos de escoamento da produção.		

continua

Tabela 3.4 – Conclusão.

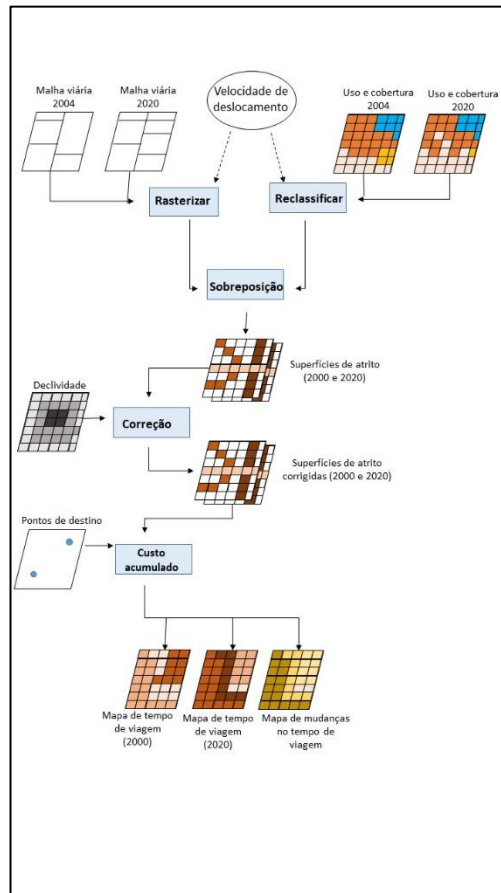
Mercado de terra	Índice de Valorização da Terra de 2020 e 2004	As áreas de cultivo de soja podem ter se expandido sob áreas com alta valorização da terra em 2020, e que possuem condições mais favoráveis ao cultivo da soja	Produzido pelo autor
	Diferença do Índice de Valorização da Terra no período de 2004 a 2020	As áreas de cultivo de soja tendem a se expandirem áreas que sofreram maior valorização fundiária no período de 2004 a 2020	

Fonte: Produção do autor.

3.3.2.1 Produção de variáveis de tempo de viagem

O método de cálculo do tempo de viagem proposto por Frey et al. (2018) foi utilizado no trabalho de Schielein et al. (2021) para mensurar o impacto das mudanças nas condições de acessibilidade na Amazônia brasileira entre os anos de 2004 e 2011 e a probabilidade de áreas terem seu uso convertido para o cultivo da soja no período de 2012 a 2014. Os autores afirmam que para a análise da expansão da soja, a utilização da distância euclidiana fornece resultados que desconsideram o traçado da rede viária e as condições de circulação. Já o cálculo do tempo de viagem, possibilita considerar a forma da malha viária e as diferentes velocidades de deslocamentos que variam de acordo com as condições das estradas, possibilitando uma análise mais adequada das condições de acessibilidade. A Figura 3.4 apresenta as etapas da construção das variáveis de tempo de viagem.

Figura 3.4 – Metodologia para a elaboração das variáveis de tempo de viagem.



Fonte: Produção do autor.

A malha viária utilizada foi a malha produzida pelo Imazon (Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia) atualizada até o ano de 2012. Portanto, se fez necessário realizar uma atualização para o ano de 2020. A atualização para o ano de 2020 foi feita tendo como base a metodologia proposta por Brandão e Souza (2006). Neste processo, foi realizada a vetorização das estradas tendo como base as imagens das bandas 6 (infravermelho médio), 5 (infravermelho próximo) e 4 (vermelho) do sensor OLI/ Landsat – 8, em uma composição falsa cor 6 (R) /5 (G) /4 (B).

Os processamentos iniciais consistiram na atribuição de velocidades às classes de uso e cobertura da terra e da malha viária. As estimativas de velocidade se basearam no trabalho de Schielein et al. (2021), uma vez que os autores também tinham como objetivo produzir dados de estimativa de tempo de viagem na região amazônica. Na Tabela 3.5 são apresentadas as velocidades atribuídas a cada classe de uso e cobertura da terra.

Tabela 3.5 - Velocidades atribuídas às classes de uso e cobertura da terra.

Classe	Velocidade Período Seco (Km/h)	Velocidade Período Chuvoso (Km/h)
Formação Florestal	3	3
Vegetação Secundária	3	3
Pastagens	15	5
Áreas agrícolas	15	5
Não Floresta	3	3
Área urbana	30	30
Mineração	1	1
Outros Usos	1	1
Desflorestamento no ano	15	5

Fonte: Adaptado de Schielein et al (2020).

Em relação à velocidade atribuída às vias, no geral, foi atribuída às vias vicinais uma velocidade de 50 km/h no período seco e 15km/h no período chuvoso, enquanto que para as rodovias federais e estaduais asfaltadas foram atribuídas a velocidade de 80 km/h em ambos os períodos. Contudo, para o ano de 2004 foi atribuída uma velocidade de 70 km/h no período seco e 30 km/h no período chuvoso para o trecho da PA- 370, na região de Santarém. De acordo com Santos (2020), a pavimentação da rodovia apresentava más condições em meados dos anos 2000 até a região da comunidade de Boa Esperança.

A verificação das condições de pavimentação das vias foi realizada a partir da utilização de planilhas disponibilizadas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT)⁵ que subdivide as rodovias federais em trechos e apresenta anualmente a infraestrutura viária. No geral, para ambas as áreas de estudo, as rodovias apresentam situações classificadas como, *em Obras de Pavimentação*, onde a rodovia ainda está em

⁵[https://servicos.dnit.gov.br/dnitcloud/index.php/s/oTpPRmYs5AAdiNr?path=%2FHist%C3%B3rico%20Planilhas%20\(1994-2010\)%20FPNV%20Planilhas%20\(1994-2010\)%20\(XLS\)](https://servicos.dnit.gov.br/dnitcloud/index.php/s/oTpPRmYs5AAdiNr?path=%2FHist%C3%B3rico%20Planilhas%20(1994-2010)%20FPNV%20Planilhas%20(1994-2010)%20(XLS))

leito natural e passa pela implementação da pavimentação e, *Pavimentadas*, quando a obra de pavimentação está completa. A partir das informações fornecidas pelas tabelas, utilizou-se um serviço *webgis*⁶ fornecido pelo DNIT onde foi possível gerar a estimativa de forma separada, para cada trecho da rodovia, possibilitando assim atribuir as velocidades de deslocamento de acordo com a situação de cada trecho.

Após a atribuição das velocidades, foi realizada a produção da superfície de atrito. Esta superfície é representada por uma superfície matricial resultante da sobreposição entre os dados viários e de uso e cobertura da terra reclassificados onde, para cada pixel é atribuído um valor de velocidade de deslocamento. Inicialmente, para a produção desta superfície matricial, o dado vetorial referente à malha viária foi convertido para o formato matricial, sendo escolhida a resolução de 10 metros, a mesma dos dados de uso e cobertura da terra. A sobreposição foi realizada utilizando a função *r.series*⁷ presente na biblioteca *GrassGis*⁸ para realizar a sobreposição entre os arquivos matriciais. Na parametrização da função, foi selecionada a opção *maximum*, para que no processo de sobreposição entre os arquivos, prevaleça o pixel que apresenta o maior valor de velocidade, garantindo que os pixels que representam a malha viária recebam sempre a prioridade.

Em seguida, foi feita a correção das velocidades presente na superfície de atrito pela declividade. Como regra, a velocidade irá decair conforme o grau de declividade, de modo que em regiões mais planas a velocidade será pouco alterada e o contrário acontecerá em regiões de alta declividade. Foi utilizado um modelo digital de elevação (DEM) disponibilizado pelo projeto TOPODATA reamostrado para 10 metros utilizando o interpolador cúbico (VALERIANO; ROSSETTI; ALBURQUERQUE, 2009). O cálculo da declividade e a conversão dos valores para radianos foram realizados utilizando a função *acc_radians*, presente no pacote *Accessibility Maps*⁹, produzido por Schielein et al. (2021) para o software R. Em seguida, recorreu-se à função *acc_slopecorr* para realizar a correção da superfície de atrito. A equação utilizada pela função para a correção (Equação 3.1) se baseou no trabalho de Van Wagendonk e

⁶<https://servicos.dnit.gov.br/vgeo/>

⁷<https://grass.osgeo.org/grass82/manuals/r.series.html>

⁸<https://grass.osgeo.org/grass83/manuals/libpython/index.html>

⁹<https://github.com/mapme-initiative/mapme.accessibility>

Benedict (1980) que propuseram uma correção para o tempo de caminhadas baseadas na topografia do terreno, e em Nelson (2008) e Weiss et al. (2018) que desenvolveram modelos de acessibilidade em áreas urbanas.

$$S = S_0^{-3(\tan(g))} \quad (3.1)$$

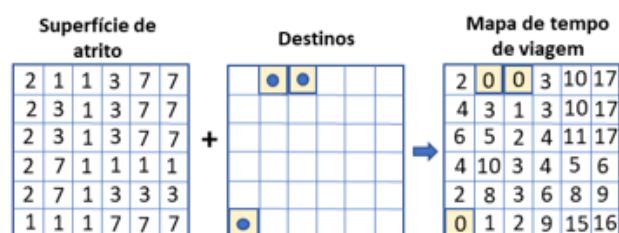
Onde:

S corresponde à velocidade corrigida; S_0 representa a velocidade sem a correção; G corresponde à declividade em radianos.

Por fim, foi calculado o custo de deslocamento na superfície de atrito corrigida. Para isso, a velocidade representada nos pixels foi convertida para metros por segundo e dividida pela resolução espacial do dado matricial (10 metros). Desta forma, cada pixel da superfície de atrito recebeu um valor que representa o custo de tempo de deslocamento.

O cálculo do custo acumulado para a produção dos mapas de estimativa de tempo de viagem foi feito usando a função *r.cost* presente no software QGIS. Esta função calcula o trajeto com o menor custo de cada pixel da superfície de atrito até um ponto de destino, o porto de Miritituba e o porto de Santarém (Figura 3.5), como definido neste trabalho. Ao fim deste processo foram gerados 6 mapas de estimativa de tempo de viagem para o período chuvoso e 6 mapas para o período seco, totalizando 12 mapas: (i) Mapa de tempo de viagem até o porto de Santarém em 2020 para o período seco e chuvoso; (ii) Mapa de tempo de viagem até o porto de Santarém em 2004 para o período seco e chuvoso; (iii) Mapa de diferença do tempo de viagem até o porto de Santarém para o período seco e chuvoso; (iv) Mapa de tempo de viagem até o porto de Miritituba em 2020 para o período seco e chuvoso; (v) Mapa de tempo de viagem até o porto de Miritituba em 2000 para o período seco e chuvoso; (vi) Mapa de diferença do tempo de viagem até o porto de Miritituba para o período seco e chuvoso.

Figura 3.5 – Exemplificação do funcionamento do cálculo da estimativa de tempo de viagem.



Fonte: Adaptado Schielein et al (2021).

3.3.2.2 Produção das variáveis relacionadas ao Índice de Valorização da Terra (IVT)

Macul (2019) propõe a construção de um Índice de Valorização da Terra (IVT) para analisar o potencial valor da terra no município de Novo Progresso. O autor explica que muitos trabalhos que buscam modelar os fatores relacionados com o valor de imóveis, utilizam modelos de regressão múltipla ou abordagem geoestatística tendo como base algumas amostras de preço no mercado. Contudo, devido à falta de dados sobre a variação espacial do preço da terra, foi proposta a criação de um índice que parte do princípio que diferentes fatores, pesquisados na literatura, e que são associados ao valor da terra, possibilitando utilizar como unidade de análise, uma grade celular.

As variáveis apresentadas na Tabela 3.6 e a metodologia para a construção do IVT neste trabalho seguem a proposta apresentada em Macul (2019). No presente trabalho propôs-se elaborar o IVT para duas datas distintas (2004 e 2020), utilizando as seguintes variáveis: proporção de Área Aberta, proporção de Vegetação Secundária, distância da área urbana, proporção de assentamentos, distância de estradas vicinais, proporção de cobertura florestal, Í proporção de área de unidade de conservação e proporção de áreas embargadas.

Todas as variáveis foram transformadas para um índice entre 0 e 1, tornando necessário estabelecer limiares máximos para a normalização (Equação 3.2). Além disso, algumas variáveis foram invertidas, uma vez que apresentaram uma relação inversa com a valorização da terra (Equação 3.3).

$$\text{Se } x \leq \text{limiar então: } x_i = \frac{x}{\text{limiar}} \quad (3.2)$$

$$\text{Se } x > \text{limiar então: } x_i = 1$$

Onde: x_i é a variável normalizada; x é a variável original antes da normalização e; o limiar é um valor estabelecido para cada variável empiricamente.

$$X_{\text{inv}} = 1 - x_i \quad (3.3)$$

Onde: x_{inv} corresponde ao fator invertido da variável x_i .

Tabela 3.6 – Variáveis utilizadas na construção do IVT.

Variável	Premissa	Limiar	Inversão
Índice de proporção de Área Aberta (AB-p)	Quanto mais aberta a área, mais valorizada será a terra. Logo, quanto maior a proporção do índice de proporção de Área aberta, maior a valorização da terra	1	Não
Índice de proporção de Vegetação Secundária (VS-p)	Quanto menos vegetação secundária, mais valorizada será a terra. Logo, quanto menor o índice de proporção de vegetação secundária, maior será a valorização.	1	Sim
Índice de distância de estradas principais (ESTP-d)	Quanto mais próximo de estradas principais, mais valorizada será a terra. Logo, quanto menor a distância, maior a valorização.	50.000m	Sim
Índice de distância de área urbana (AU-d)	Quanto mais próximo de áreas urbanas, mais valorizada será a terra. Logo, quanto menor a distância, maior a valorização.	60.000m	Sim
Índice de distância de estradas vicinais (EST-d)	Quanto mais próximo de estradas vicinais, mais valorizada será a terra. Logo, quanto menor a distância, maior a valorização.	6.000m	Sim

continua

Tabela 3.6 – Conclusão.

Índice de tamanho médio dos imóveis (IR-m)	Quanto menor a área média dos imóveis, maior a valorização.	25 km ²	Sim
Índice de proporção de Imóveis certificados (CRT-p)	Quanto maior a proporção dos imóveis certificados, maior a valorização.	1	Não
Índice de mediana da declividade (DCV)	Quanto menor for a declividade, maior será a valorização. Logo, quanto menor a mediana da declividade, maior a valorização	13%	Não
Índice de distância de rios (RIO-d)	Quanto mais próximo de rios, mais valorizada será a terra. Logo, quanto menor a distância, maior a valorização.	10.000m	Sim
Índice de proporção de assentamentos (AST-p)	Áreas de assentamentos influenciam negativamente a valorização da terra. Logo, quanto maior o índice de proporção de assentamentos, menor será a valorização.	1	Sim
Índice de proporção de embargos (EMB-p)	Quanto mais embargos, menor será a valorização da terra. Logo, quanto maior o índice de proporção de embargos, menor será a valorização.	1	Sim
Índice de proporção de cobertura florestal (FLR-p)	Quanto menos floresta, mais valorizada será a terra. Logo, quanto menor o índice de proporção de cobertura florestal, maior será a valorização.	1	Sim
Índice de proporção de unidade de conservação (UC-p)	Áreas de assentamentos influenciam negativamente a valorização da terra. Logo, quanto maior o índice de proporção de unidades de conservação, menor será a valorização.	1	Sim
Índice de proporção de terras indígenas (TI-p)	As terras indígenas influenciam negativamente a valorização da terra. Logo, quanto maior o índice de proporção de terras indígenas, menor será a valorização.	1	Sim

Fonte: Adaptado de Macul (2019).

A comparação pareada para analisar a contribuição das variáveis no atendimento ao objetivo de análise do IVT foi realizada pelo autor a partir do método de processo analítico hierárquico (do inglês: *Analytical Hierarchy Process* – AHP) (Figura 3.6). Na matriz de comparação variada, os valores variam de 1 a 9, onde o valor 1 expressa que as duas variáveis contribuem igualmente para o objetivo e o valor 9 informa que uma variável contribui consideravelmente mais que a outra. A matriz de comparação pareada produzida por Macul (2019) apresenta uma razão de consistência de 0,06. Além disso, o autor fez testes de sensibilidade em que se variou 0.5 para cada importância atribuída na comparação pareada e foram realizadas 1000 simulações e derivaram-se os pesos globais novamente para cada simulação.

Figura 3.6 - Matriz de comparação pareada das variáveis.¹⁰

Fatores	AB-p	VS-p _{inv}	BR-d _{inv}	AU-d _{inv}	EST-d _{inv}	IR-m _{inv}	CRT-p	DCV _{inv}	RIO-d _{inv}	AST-p _{inv}	EMB-p _{inv}	FLR-p _{inv}	UC-p _{inv}	TI-p _{inv}
AB-p	1	2	2	3	4	4	5	6	6	7	7	8	9	9
VS-p _{inv}		1	1	2	3	3	4	5	5	6	7	8	9	9
BR-d _{inv}			1	1	2	4	5	6	6	6	7	8	9	9
AU-d _{inv}				1	1	2	4	4	4	5	6	8	9	9
EST-d _{inv}					1	1	2	4	4	4	6	7	8	8
IR-m _{inv}						1	1	3	3	4	5	7	8	8
CRT-p							1	3	3	4	5	7	8	8
DCV _{inv}								1	1	3	4	7	8	8
RIO-d _{inv}									1	3	4	6	7	8
AST-p _{inv}										1	2	4	7	8
EMB-p _{inv}											1	4	5	7
FLR-p _{inv}												1	3	4
UC-p _{inv}													1	3
TI-p _{inv}														1

Fonte: Macul (2019).

¹⁰**AB-p**: índice de proporção de área aberta; **VS-p_{inv}**: índice invertido de proporção de vegetação secundária; **BR-d_{inv}**: índice invertido de distância da BR-163; **AU-d_{inv}**: índice invertido de distância de área urbana; **EST-d_{inv}**: índice invertido de distância de estradas vicinais; **IR-m_{inv}**: índice invertido de tamanho médio dos imóveis; **CRT-p**: índice de proporção de imóveis certificados; **DCV_{inv}**: índice invertido de declividade; **RIO-d_{inv}**: índice invertido de distância de rios; **AST-p_{inv}**: índice invertido de proporção de assentamento; **EMB-p_{inv}**: índice invertido de proporção de embargo; **FLR-p_{inv}**: índice invertido de proporção de cobertura florestal até 2013. **UC-p_{inv}**: índice invertido de proporção de unidade de conservação; **TI-p_{inv}**: índice invertido de proporção de terra indígena.

Como resultado da análise AHP, foram obtidos pesos para cada uma das variáveis para a composição do IVT (Tabela 3.7). A partir deste resultado, foi realizada uma soma ponderada em todas as células da grade. Por fim foram gerados mapas com o IVT para os anos de 2004 e 2020, além do mapa da diferença entre os anos para ambas as áreas de estudo.

Tabela 3.7 – Pesos derivados da AHP.

Fator	Pesos Derivados %	% acumulada
AB-p	0,2019	20%
VS-p	0,1464	35%
ESTP-d	0,1464	49%
AU-d	0,0984	59%
EST-d	0,0859	68%
IR-m	0,0745	75%
CRT-p	0,0662	82%
DCV	0,0454	87%
RIO-d	0,0436	91%
AST-p	0,0313	94%
EMB-p	0,0250	97%
FLR-p	0,0151	98%
UC-p	0,0110	99%
TI-p	0,0089	100%

Fonte: Adaptado de Macul (2019).

3.3.3 Modelo de regressão logística

A variável resposta binária utilizada corresponde à ausência (0) e à presença (1) de áreas de expansão do cultivo de soja verificadas entre os anos de 2004 e 2020. Para o valor 1 ser atribuído a uma determinada célula, foi estabelecido de forma empírica um limiar na

qual pelo menos 10% da célula deve estar recoberto por áreas de expansão de soja observada no período de 2004 a 2020. Como exemplificado na Figura 3.7, as células que apresentam um baixo percentual de área de expansão correspondem à locais em que ocorrem erros de classificação ou são células com áreas residuais resultantes do recorte de talhões devido à sobreposição da grade. Com a aplicação do limiar, o valor 1 foi atribuído a 242 células, enquanto que o valor 0 foi atribuído a 1032 células.

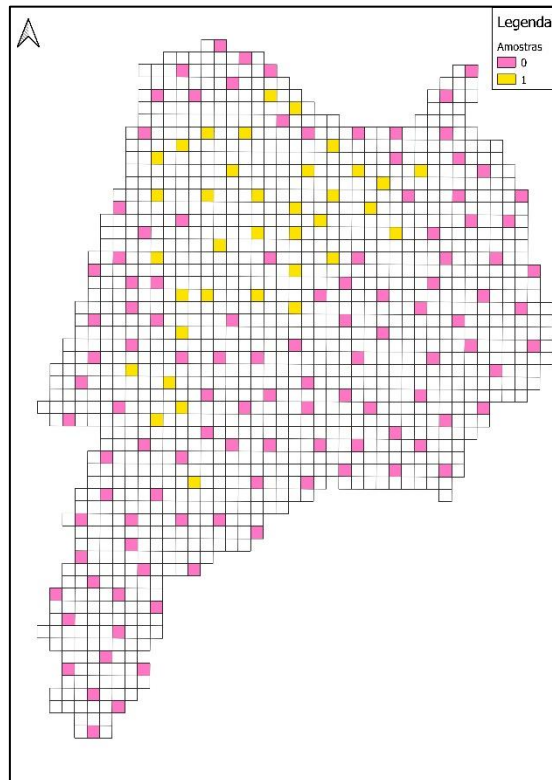
Figura 3.7 – Células com problemas na classificação das áreas de cultivo de soja.



Fonte: Produção do autor.

Em seguida, foi realizada uma amostragem das células para evitar auto correlação espacial. Foi definido um espaço amostral equivalente a 15% (191) do número total de células presentes da grade. Em seguida foi realizada uma amostragem estratificada de acordo com a proporção de células com valor 0 e 1, a proporção é 18% de células com valor 1 e 82% de células com valor 0. Desta forma foram selecionadas 34 células com valor 1 e 157 com valor 0. A Figura 3.8 apresenta a distribuição espacial das amostras ao longo da grade celular.

Figura 3.8 – Distribuição das amostras na região de Santarém.



Fonte: Produção do autor.

Como suporte para o processo de seleção do conjunto de variáveis a serem utilizadas na construção do modelo de regressão logística, foi analisada a multicolinearidade entre as variáveis independentes. A multicolinearidade é uma condição que ocorre quando algumas variáveis independentes no modelo estão correlacionadas entre si, podendo acarretar perda da significância do coeficiente β (beta) associado à uma das variáveis independentes do modelo. Para realizar essa verificação, foi utilizado o fator de inflação da variância (do inglês: *Variance Inflation Factor* – VIF). De forma geral, um valor de VIF abaixo de 10 pode ser considerado satisfatório para se evitar problemas com multicolinearidade (NETER et al., 1996). As variáveis que não apresentaram multicolinearidade foram inseridas no modelo de regressão logístico. Em caso de colinearidade entre duas variáveis, foi mantida aquela que possui o melhor poder explicativo, de acordo com a bibliografia consultada. Das 22 variáveis criadas, 10 foram selecionadas após a análise de multicolinearidade.

A seleção das variáveis para compor o modelo foi feita com o uso da técnica *stepwise*. Ela consiste em adicionar e remover iterativamente as variáveis independentes no intuito de encontrar o subconjunto de variáveis que resulta no melhor desempenho do modelo. O método *stepwise* foi realizado no modo *both*, onde em cada passo testa-se a entrada e a retirada de cada uma das variáveis independentes. O critério para a seleção do conjunto de variáveis que resulta no modelo com melhor desempenho foi o Critério de Informação de Akaike (AIC). O AIC estima a quantidade relativa de informação perdida por um determinado modelo: quanto menos informações um modelo perde, maior a qualidade desse modelo e menor a pontuação AIC. Logo, quanto menor for o valor AIC, melhor será o modelo.

Após a seleção das variáveis, o modelo final passará por testes para avaliar o seu desempenho e ajuste em um novo conjunto amostral de 107 células, 27 onde ocorre a expansão do cultivo da soja e 80 onde não ocorre expansão. O ajuste do modelo será avaliado a partir do teste de Hosmer e Lemeshow (HOSMER; LAMESHOW, 2000). A hipótese nula avaliada pelo teste (H_0) é de que não há diferenças significativas entre os resultados preditos pelo modelo e os dados observados, o que indica que o modelo apresenta um bom ajuste.

A avaliação da capacidade discriminativa do modelo proposto será realizada utilizando o indicador da Área sob a Curva (AUC) gerada a partir da curva ROC (do inglês: *Receiver Operating Characteristic Curve*). A curva ROC é uma representação gráfica do desempenho de um sistema classificador binário conforme seu limite de discriminação varia (HANLEY; MCNEIL, 1982). Ela é gerada a partir da relação entre a taxa dos verdadeiros positivos do modelo e da taxa dos falsos positivos preditos (FAWCETT, 2006). A partir da curva ROC é possível quantificar a Área sob a Curva. A AUC fornece uma medida da capacidade discriminativa do modelo, o valor deste indicador varia de 0 a 1, onde: $AUC = 0.5$ indica que o modelo não possui capacidade de discriminação; $0.7 \leq AUC < 0.8$ indica que o modelo tem uma capacidade discriminativa aceitável; $0.8 \leq AUC < 0.9$ indica que o modelo tem uma capacidade discriminativa aceitável excelente; $AUC > 0.9$ indica que o modelo tem uma capacidade discriminativa aceitável excepcional (HOSMER; LAMESHOW, 2000).

3.3.4 Índice de suscetibilidade à expansão da soja

Para identificar os locais das regiões de Novo Progresso e Santarém onde existem condições mais favoráveis a expansão da soja, foi proposta a criação do Índice de suscetibilidade à expansão da soja, representado por células, utilizando mais uma vez, o método AHP. Como não foi possível criar um modelo de regressão para a região de Novo Progresso, que possui poucas áreas cultivo de soja, o índice auxiliará a análise e identificação das áreas com maior probabilidade de expansão do cultivo de soja na região, assim como os locais com os fatores que mais favorecem a realização do cultivo. O índice também irá possibilitar uma análise comparativa entre as duas regiões.

A seleção de variáveis que compõem o índice foi baseada nas variáveis selecionadas para compor o modelo de regressão logística e também na literatura e sintetizada na Tabela 3.8. As variáveis foram transformadas para um índice entre 0 e 1, algumas delas invertidas, uma vez que a sua relação com o processo de expansão do cultivo da soja é inversa.

Tabela 3.8 – Variáveis utilizadas na composição do índice de suscetibilidade.

Variável	Premissa	Inversão
Proporção de área de Platô (Plt)	As áreas de platô apresentam condições favoráveis para o cultivo de soja, pois favorecem a mecanização. Quanto maior a proporção de áreas de platô, melhores são as condições para a expansão da soja	Não
Tempo de viagem até o porto no período chuvoso(TVp)	As áreas de cultivo de soja se localizam, principalmente, em locais com boas condições de tráfego até os portos no período chuvoso, quando as vias não pavimentadas apresentam péssimas condições de tráfego. Quanto menor o tempo de viagem até o porto, melhores são as condições para a expansão da soja	Sim
Proporção de terras indígenas (TI)	Em terras indígenas não é permitido atividade agrícola de larga escala. Quanto maior a proporção de terras indígenas na célula, maiores são as restrições a expansão da soja	Sim

continua

Tabela 3.8 – Continuação.

Proporção de área desmatadas após o ano de 2008 (Desmat)	As áreas desmatadas após 2008 estão em desacordo com a moratória soja. Quanto maior a proporção de áreas desmatadas após 2008, maiores são as restrições a expansão da soja	Sim
Proporção de áreas de Floresta (Flr)	As áreas de florestas podem ser um impeditivo para a expansão da soja, devido ao alto custo para remover da cobertura florestal e o risco de embargos comerciais. Quanto menor a proporção de floresta, melhores são as condições para a expansão da soja	Sim
Proporção de unidades de conservação (UC)	A depender da modalidade das unidades, é proibido qualquer tipo de atividade agrícolas, em apenas algumas modalidades são apenas permitidas atividades agroextrativistas ou de agricultura pequena escala. Quanto maior a proporção de unidade de conservação, maiores são as restrições a expansão da soja	Sim
Tamanho médio do imóvel (CAR) (TMcar)	A soja é cultivada em grandes propriedades rurais, para que retorno financeiro satisfatório, e para que compense os custos associados ao cultivo. Quanto maior o tamanho médio dos imóveis, melhores são as condições para a expansão da soja na célula.	Não
Proporção de assentamentos (Assent)	Em áreas de assentamentos predominam atividades agrícolas de pequena escala. Quanto maior a proporção de área dos assentamentos nas células, maiores são as restrições para a expansão da soja.	Sim

continua

Tabela 3.8 – Conclusão.

<p>Proporção de áreas de pastagem (Past)</p>	<p>As áreas de pastagens apresentam características que favorecem a conversão do uso para o cultivo de soja com um custo menor se comparado aos outros tipos de cobertura da terra. Quanto maior a proporção de pastagem, melhores são as condições para a expansão da soja</p>	<p>Não</p>
<p>Proporção de áreas de Vegetação Secundária (VS)</p>	<p>As áreas de vegetação secundária podem ser convertidas para áreas de pastagem e se tornar áreas de plantio de soja. São locais que podem estar abandonados ou sendo usados como reserva de terras. Quanto maior a proporção de vegetação secundária, maior a quantidade de terras disponíveis para a expansão da soja</p>	<p>Não</p>
<p>Índice do tempo de viagem até a área urbana mais próxima no período chuvoso (TVu)</p>	<p>É importante ter boas condições de acesso até os centros urbanos, principalmente para o deslocamento da mão de obra e para a compra de insumos. Quanto menor o tempo de viagem até o porto, melhores são as condições para a expansão da soja</p>	<p>Sim</p>

Fonte: Produção do autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise do refinamento dos dados de uso e cobertura da terra do projeto TerraClass

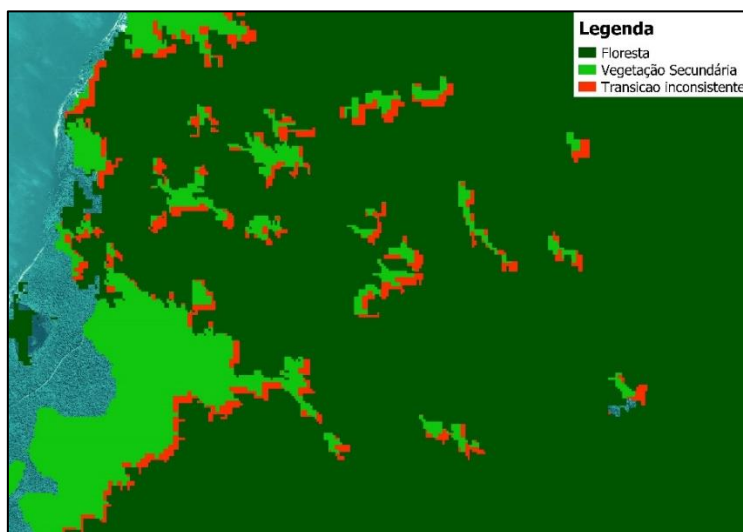
Ao realizar a análise das transições das classes de uso e cobertura da terra, foram geradas duas classificações para os anos de 2004 e 2020 nas quais os valores dos pixels representam as transições entre classes, em ambas as áreas de estudo. Para a região de Santarém foram encontrados 98 tipos de transições e na região de Novo Progresso, foram encontrados 103.

Considerando as regras estabelecidas e descritas na Seção 4.1, para nortear a avaliação das transições, observando se são inconsistentes ou não, identificou-se que 56 das 98 transições encontradas na região de Santarém são inconsistentes, correspondendo a 3,15% (391 km²) em relação a área total observada. Na região de Novo Progresso 57 das 103 transições foram consideradas inconsistentes, correspondendo a 1,04% (522 km²) da área total analisada.

Na região de Santarém foram observadas 3 (três) transições inconsistentes mais frequentes, representando 1,92% dos 3,15% da área total das transições inconsistentes, são elas:

- a) Áreas classificadas como *Vegetação Secundária* em 2004 que transicionam para a classe *Floresta* em 2020. Esta transição inconsistente foi a mais representativa, com uma área proporcional de 1,18%. No geral, essa transição inconsistente ocorreu de forma espalhada ao longo de toda região de Santarém, principalmente em áreas de borda entre as classes de *Vegetação Secundária e Floresta* (Figura 4.1). Desta forma pode-se inferir que tal transição inconsistente pode estar associada a problemas de geometria dos objetos mapeados e/ou deslocamentos entre as classificações de 2004 e 2020.

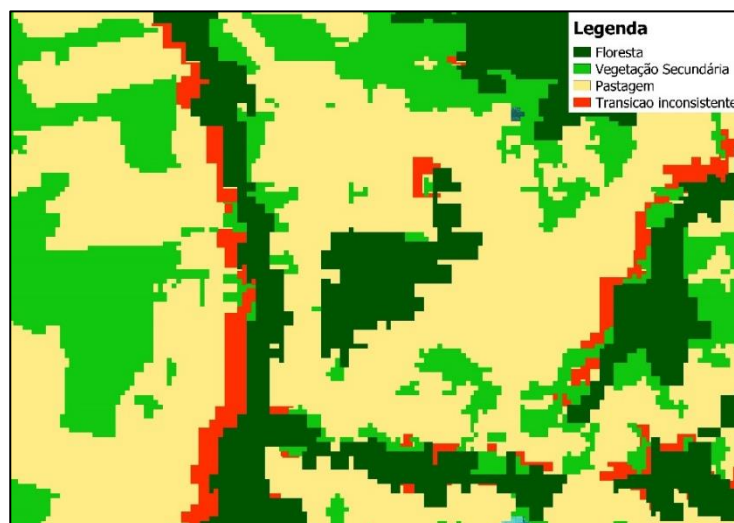
Figura 4.1 – Exemplo da ocorrência da transição inconsistente *Vegetação Secundária* (2004) – *Floresta* (2020).



Fonte: Produção do autor.

- b) Áreas classificadas como *Pastagem* em 2004 que transicionam para a classe *Floresta* em 2020. A área proporcional desta transição é de 0,58%. De modo geral, essa transição ocorreu de maneira uniforme em toda a região de Santarém, especialmente em áreas de borda entre as classes de *Pastagem* e *Floresta* (Figura 4.2). Isso sugere que a inconsistência pode também estar relacionada a problemas de geometria dos objetos mapeados e/ou deslocamentos entre as classificações realizadas em 2004 e 2020.

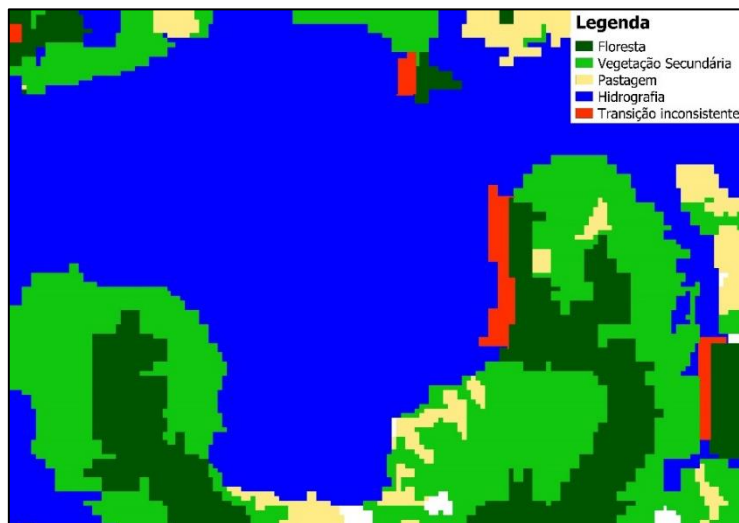
Figura 4.2 – Exemplo da ocorrência da transição inconsistente *Pastagem* (2004) – *Floresta* (2020).



Fonte: Produção do autor.

- c) Áreas classificadas como *Hidrografia* em 2004 que transicionam para a classe *Floresta* em 2020. A proporção de área desta transição inconsistente é de 0,16%. A ocorrência dessa transição se deu, sobretudo, ao longo do rio Curuá – Una, em áreas de borda entre a classe de *Hidrografia* e *Floresta* (Figura 4.3). O padrão de ocorrência desta transição sugere que a inconsistência está associada a problemas de variação da lâmina d'água ou de deslocamentos e/ou de geometria dos objetos mapeados entre as duas classificações.

Figura 4.3 – Exemplo da ocorrência da transição inconsistente *Hidrografia* (2004) – *Floresta* (2020).

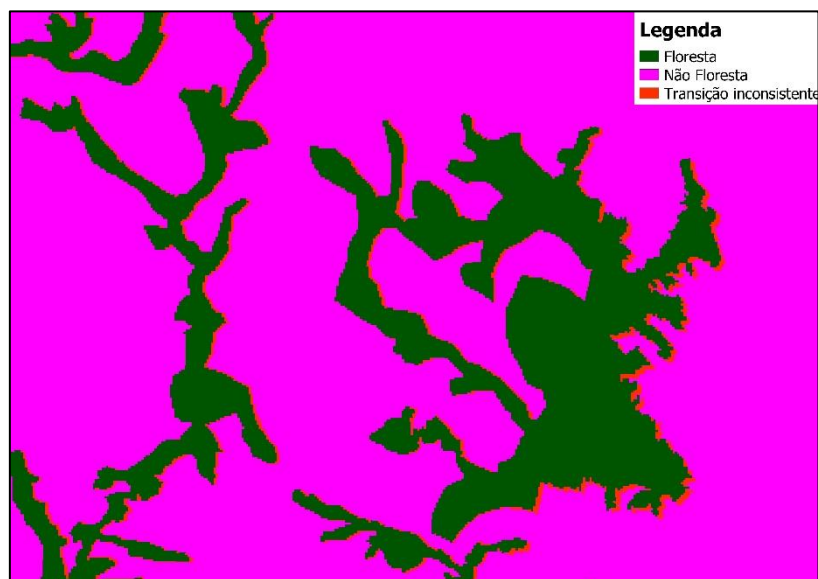


Fonte: Produção do autor.

Na região de Novo progresso foram observadas 3 transições inconsistentes bastante representativas, que correspondem a 0,52% dos 1,04% da área total observada com transições inconsistentes, são elas:

- a) Áreas classificadas como *Floresta* em 2004 que transicionam para a classe *Não Floresta* em 2020. Esta transição inconsistente foi a mais representativa na região, com uma área proporcional de 0,20%. De forma geral, essa transição ocorreu de forma concentrada, na borda das manchas de áreas de *Não Floresta*, principalmente na parte sul da região de Novo Progresso, na região da Serra do Cachimbo (Figura 4.4). Essa transição inconsistente também possui um padrão espacial que permite inferir que sua ocorrência pode estar associada a problemas de geometria dos objetos mapeados e/ou deslocamento entre as classificações de 2004 e 2020.

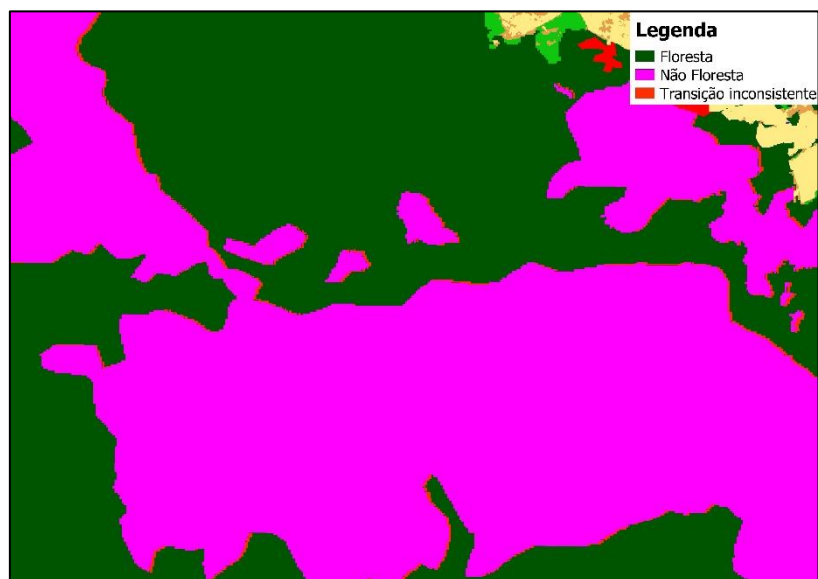
Figura 4.4 – Exemplo da ocorrência da transição inconsistente *Floresta* (2004) – *Não Floresta* (2020).



Fonte: Produção do autor.

- b) Áreas classificadas como *Não Floresta* em 2004 que transicionam para a classe *Floresta* em 2020. Esta transição inconsistente possui uma área proporcional de 0,18% na região. Assim como na transição referida no tópico anterior, essa transição ocorreu de forma concentrada, na borda das manchas de áreas de *Não Floresta*, na parte sul da região de Novo Progresso, na região da Serra do Cachimbo (Figura 4.5).

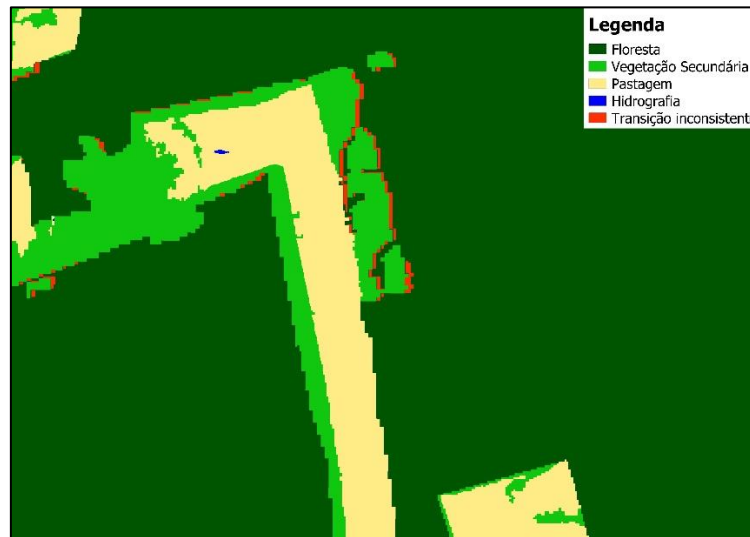
Figura 4.5 – Exemplo da ocorrência da transição inconsistente *Não Floresta* (2004) – *Floresta* (2020).



Fonte: Produção do autor.

- c) Áreas classificadas como *Vegetação Secundária* em 2004 que transicionam para a classe *Floresta* em 2020. Esta transição inconsistente representa uma proporção de área de 0,12% na região. Essa transição ocorre ao longo de toda região, em áreas de borda entre as classes *Floresta e Vegetação Secundária* (Figura 4.6).A inconsistência dessa transição pode estar associada a problemas de deslocamento dos objetos mapeados e/ou de geometria entre as duas classificações.

Figura 4.6 – Exemplo da ocorrência da transição inconsistente *Vegetação secundária* (2004) – *Floresta* (2020).



Fonte: Produção do autor.

O padrão das demais transições inconsistentes, em ambas as áreas de estudo, são semelhantes ao apresentado anteriormente: se concentram, sobretudo, em áreas de borda entre diferentes classes. Desta forma, pode-se afirmar que as inconsistências verificadas podem estar associadas a problemas de geometria dos objetos mapeados e/ou de deslocamento entre as duas classificações, provocadas pela utilização de imagens geradas por sensores com resolução espacial diferentes, Landsat (30m) na classificação do ano de 2004 e Sentinel (10m) para o ano de 2020.

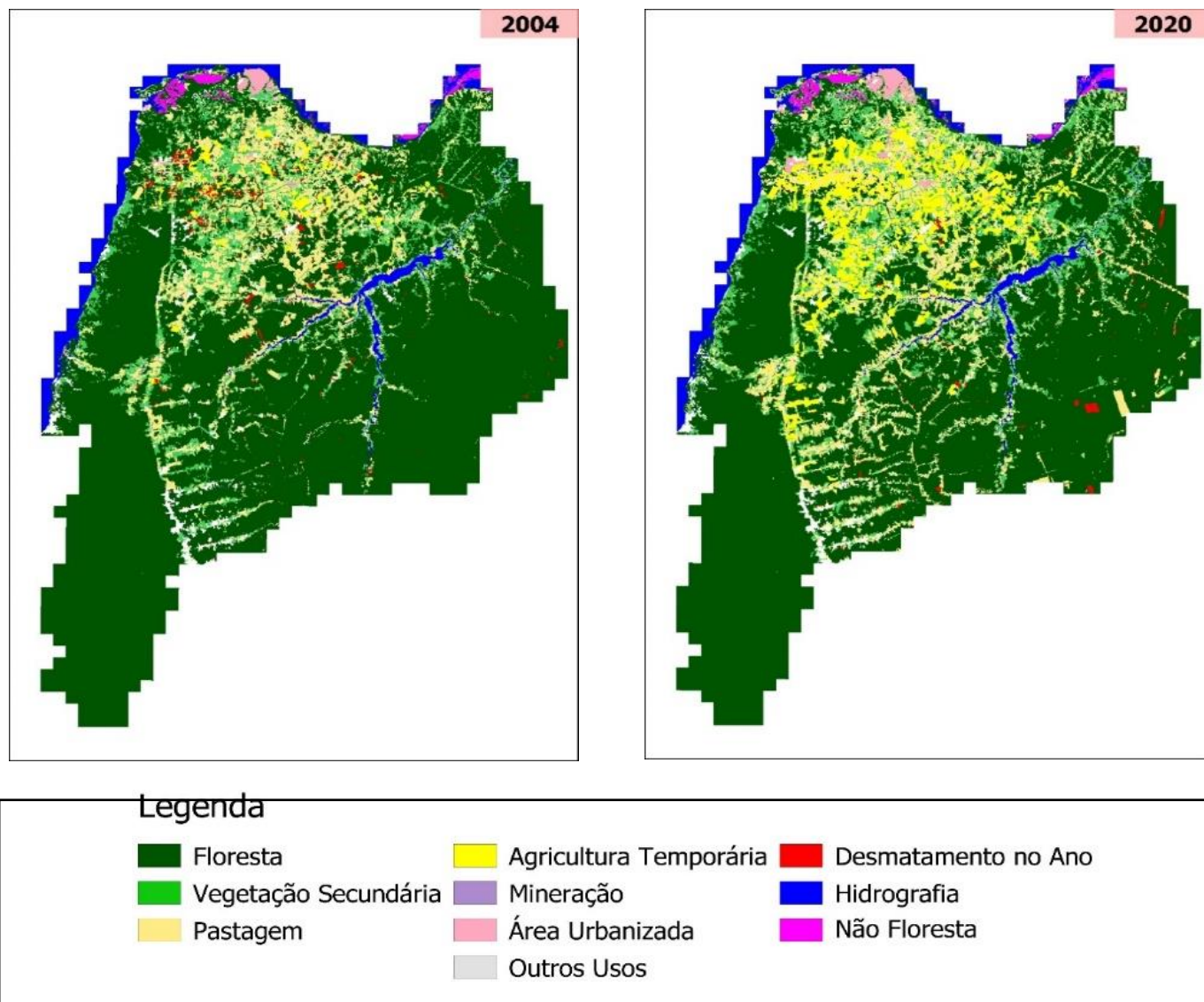
Embora a área correspondente às transições inconsistentes tenha sido pequena, esta etapa de detecção e análise de transições é essencial para garantir a consistência entre as bases de uso e cobertura da terra utilizadas. Como estes dados serviram de base para a construção de diferentes variáveis, algumas baseadas na diferença entre o valor verificado em 2020 e 2004, caso as transições inconsistentes representassem áreas maiores e não fossem corrigidas, poderiam gerar valores incorretos e prejudicar as análises realizadas nas etapas posteriores.

4.2 Análise das transições do uso e cobertura da terra.

4.2.1 Região de Santarém

Após a identificação e edição das transições inconsistentes, foi realizada uma reclassificação para produzir os dados para o ano de 2020. A Figura 4.7 apresenta os mapas de uso e cobertura da terra para a região de Santarém. A Figura 4.8 apresenta a matriz de transição entre as classes de 2004 a 2020, enquanto que a Tabela 4.1 apresenta a variação da área total das classes entre 2004 e 2020.

Figura 4.7 – Mapas de uso e cobertura da terra da região de Santarém para os anos de 2004 e 2020.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.8 –Matriz de transição de classes entre 2004 e 2020 na Região de Santarém.

2004	Transições	2020										
		Floresta	Vegetação Secundária	Pastagem	Agricultura Temporária	Mineração	Área Urbanizada	Outros Usos	Desmatamento no ano	Não Floresta	Hidrografia	Total
	Floresta	8081,57(88,56%)	408,92(4,48%)	474,24(5,2%)	98,9(1,08%)	0(0%)	10,32(0,11%)	0(0%)	51,16(0,56%)	0(0%)	0(0%)	9125,11(100%)
	Vegetação Secundária	0(0%)	687,57(59,49%)	323,78(28,01%)	132,28(11,45%)	0(0%)	12,13(1,05%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	1155,76(100%)
	Pastagem	0(0%)	265,91(20,02%)	656,26(49,42%)	388,88(29,28%)	0(0%)	16,9(1,27%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	1327,95(100%)
	Agricultura Temporária	0(0%)	0(0%)	0(0%)	118,22(100%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	118,22(100%)
	Mineração	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0,28(0,56%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0,28(0,56%)
	Área Urbanizada	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	49,39(100%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	49,39(100%)
	Outros Usos	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	15,62(100%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	15,62(100%)
	Desmatamento no ano	0(0%)	13,66(14,14%)	26,78(27,73%)	55,64(57,62%)	0(0%)	0,49(0,51%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	96,57(100%)
	Não Floresta	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	77,29(100%)	0(0%)	77,29(100%)
	Hidrografia	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	475,91(100%)	475,91(100%)
	Total	8081,57	1376,06	1481,06	793,92	0,28	89,23	15,62	51,16	77,29	475,91	12442,09

Fonte: Produção do autor.

Tabela 4.1 – Áreas total e relativa das classes nos anos de 2004 e 2020 na Região de Santarém.

Classe	2004		2020	
	Km ²	(%)	Km ²	(%)
<i>Floresta</i>	9125,10	73,34	8081,57	64,95
<i>Vegetação Secundária</i>	1155,76	9,28	1376,05	11,06
<i>Pastagem</i>	1327,95	10,63	1481,06	11,90
<i>Agricultura Temporária</i>	118,21	0,95	793,91	6,38
<i>Mineração</i>	0,27	0,00	0,27	0,002
<i>Área Urbanizada</i>	49,38	0,39	89,22	0,71
<i>Outros Usos</i>	15,61	0,12	15,61	0,12
<i>Não Floresta</i>	77,29	0,62	77,29	0,62
<i>Hidrografia</i>	475,90	3,82	475,90	3,82
<i>Desmatamento no Ano</i>	96,56	0,76	51,15	0,411

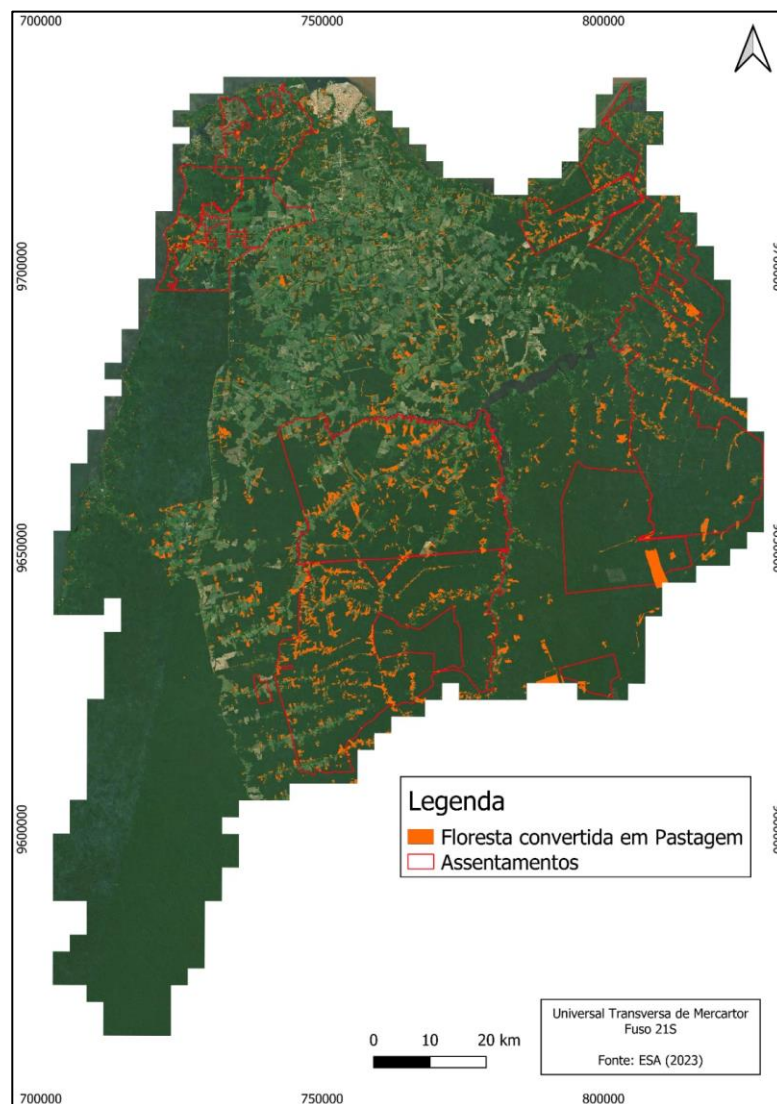
Fonte: Produção do autor.

A área total da classe *Floresta* recuou de 9.125 km² em 2004 para 8.081 km² em 2020. A maior parte dos 1.044 km² desmatados foi convertida para três classes: *Pastagem* (474,2 km²), *Vegetação Secundária* (409 km²) e *Agricultura temporária* (154 km²).

Em relação às áreas desmatadas convertidas para pastagem, notou-se que essa transição ocorre em toda região (Figura 4.9). Contudo, a conversão de áreas de floresta

parapastagem ocorre de forma mais intensa dentro dos limites de alguns assentamentos da região das modalidades *Projeto de Assentamento Federal (PA)* e *Projeto de Assentamento Coletivo (PAC)*, indicando novas frentes de ocupação, em áreas institucionalizadas. Dentro dos limites dos assentamentos PA Corta Corda, PA Ituqui, PA Moju I e II, PA Tapera Velha e PAC Bom Sossego, ocorre cerca de 47% (223 km²) desta transição (1.044 km²). É possível observar também nessa figura, nos assentamentos MOJU I e II, uma área desmatada não compatível com tamanho dos lotes de assentamentos do INCRA.

Figura 4.9—Áreas de Floresta convertidas em Pastagem entre 2004 e 2020 na região de Santarém.



Fonte: Produção do autor

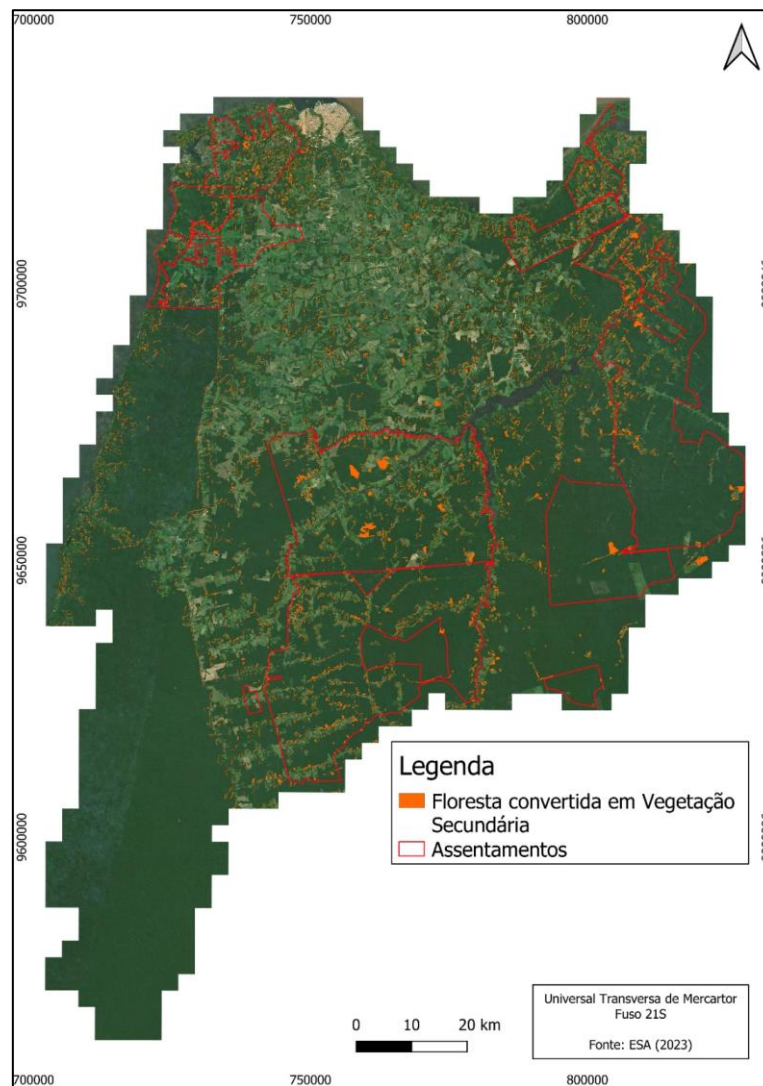
A entrada e expansão dos sistemas produtivos associados à agricultura de larga escala provocou uma reconfiguração do espaço agrário na região. Dentre essas transformações, destaca-se o deslocamento de partes dos pequenos agricultores que ocupavam a área do planalto Santareno em direção a áreas periféricas da região de Santarém, assim como o deslocamento de alguns pequenos produtores para os centros urbanos (CARDOSO; OLIVEIRA; GOMES, 2020; COELHO et al., 2021). As mudanças de uso da terra na região metropolitana de Santarém mostram que ocorreu um aumento das áreas de agricultura anual e pastagem de 15,6% para 21,0%, respectivamente, entre 2004 e 2014. Estas áreas sobrepueram as áreas de agricultura familiar, que diminuíram sua participação no território de 3,7% para 0,8%, neste período (CORTES et al., 2020).

Em meio a este processo, surgiram novas comunidades na região, como a comunidade Bom Sossego, estabelecida por volta do ano de 2004 e localizada a 76 km da Rodovia BR-163, formada por antigos moradores residentes da comunidade de São Raimundo do Tracoá, extinta devido à aquisição de pequenas propriedades por produtores de grãos, ambas as comunidades se situam no município de Belterra (COELHO, 2009). No decorrer desta dinâmica migracional intra-regional mencionada, algumas famílias de pequenos proprietários podem ter sido alocadas nos projetos de assentamentos já existentes na região. Desta forma, embora seja não sejam diretamente responsável pelo desmatamento, após 2008, a expansão dos sistemas produtivos de larga escala na região provocaram migrações intra-regionais que deram origem a novas frentes de ocupação na região (VENTURIERI et al., 2007; CORTES; D'ANTONNA, 2016). Mais importante que o grande crescimento da produção da soja foram as alterações induzidas pelos investimentos em infraestrutura, provocando um processo de reconfiguração territorial e de reestruturação nas relações econômico-espaciais nas zonas rural e urbana (CARDOSO, 2019).

A segunda transição com maior área total envolvendo o desmatamento foi a conversão de áreas de Floresta para Vegetação Secundária, com 408,9 km² (Figura 4.10). A vegetação secundária tem um papel importante no desenvolvimento de algumas atividades produtivas na região, como, por exemplo, na prática de roçado que conta com queima da vegetação secundária, seguida de abandono por 5 anos recuperar a fertilidade do solo, realizada principalmente em sistemas de agricultura de pequena escala (COSTA, 2016; PACHECO, 2023; REIS, 2022). Além disso, a vegetação secundária pode refletir a

presença de sistemas agroflorestais e de agricultura perene, associada à agricultura de pequena escala, assim como o abandono de áreas desmatadas em áreas remotas para uso futuro no mercado de terras (MACUL, 2019).

Figura 4.10 – Áreas de Floresta convertidas em Vegetação Secundária entre 2004 e 2020 na região de Santarém.

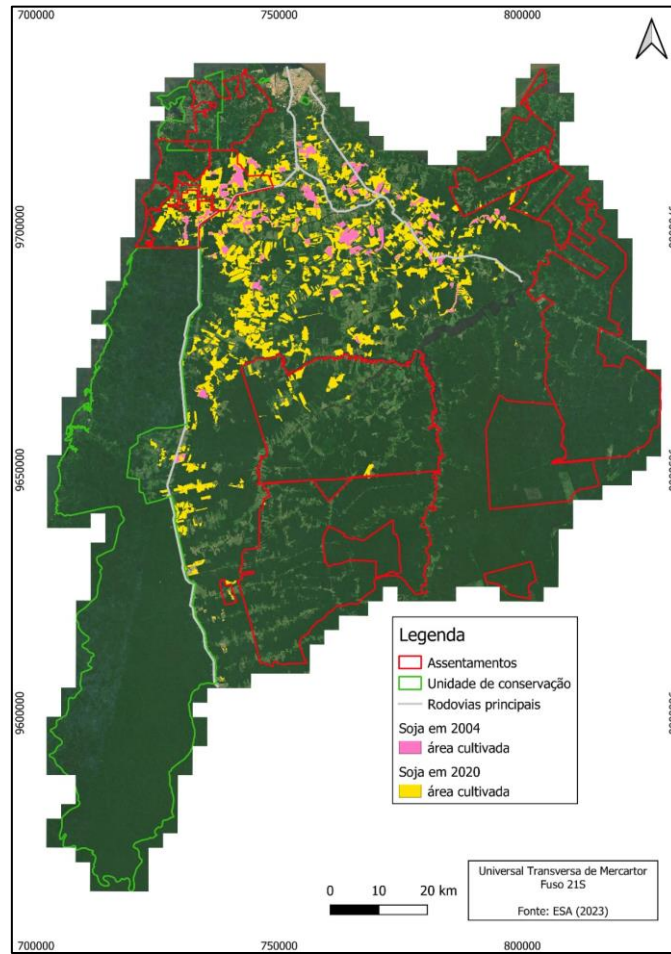


Fonte: Produção do autor.

Analisando espacialmente a ocorrência dessa transição, observou-se que ela ocorre de forma bem distribuída. Na região do planalto santareno, a ocorrência dessa transição pode estar associada à presença de pequenos produtores que ainda ocupam a localidade (SOUZA et al. 2017; PAULA, 2021). No interior dos assentamentos e das unidades de

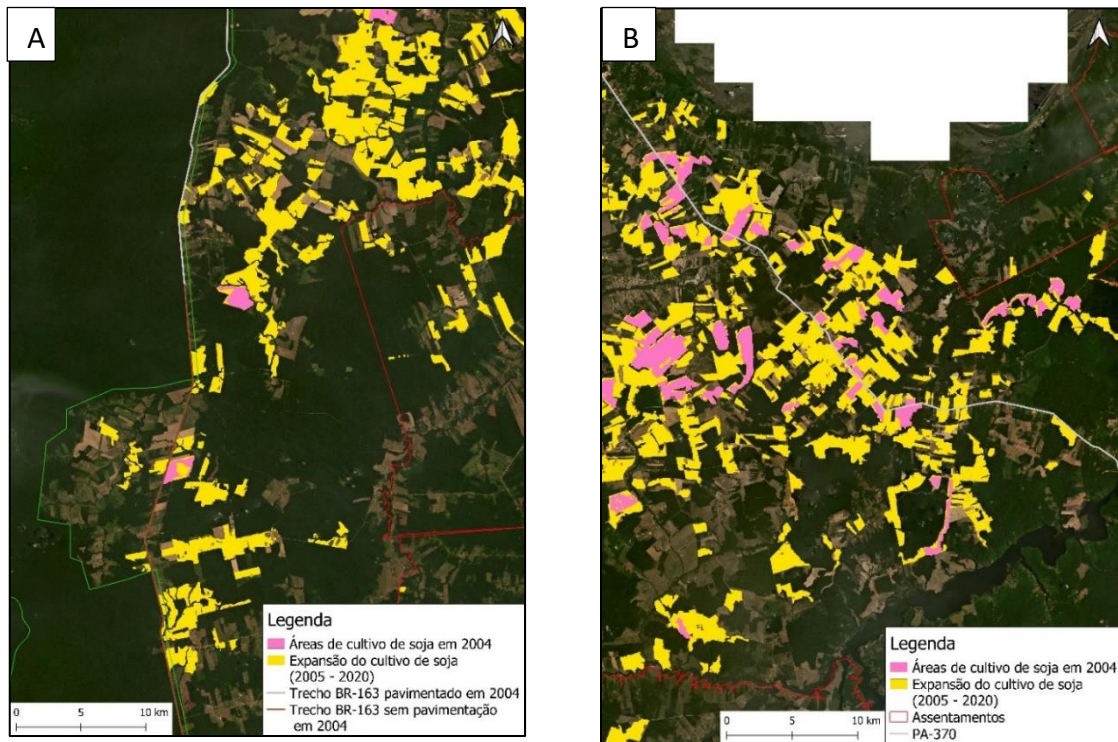
conservação, principalmente na Flona Tapajós, a presença da vegetação secundária está associada a sistemas agroflorestais, atividades agroextrativistas, de agricultura perene e dos roçados (aqui a mandioca deve ser considerada, e como no ibge esse cultivo é considerado como agribultura temporária, nos também consideramos), ao contrário das transições de supressão florestal para a abertura de novas pastagens, a transição para vegetação secundária ocorre também nos projetos de assentamento da modalidade *Projeto de Assentamento Agroextrativista*, onde são desenvolvidas atividades agrícolas extrativistas ou de pequena escala. Nas áreas de borda no entorno da região do planalto, essa transição mostra a dinâmica da fronteira de ocupação, em que sistemas agrários camponeses são pressionados para essa região (PAULA, 2022). No trabalho de Santos (2020) foi evidenciado que parte dos pequenos produtores da comunidade Boa Esperança, em Santarém, venderam suas terras para produtores de soja e compraram terras em áreas mais afastadas, onde continuaram a desenvolver suas atividades agrícolas de pequena escala. A área total da classe *Agricultura Temporária*, considerada como *proxy* para representar as áreas de cultivo de soja, cresceu de 118 km² em 2004 para 793 km² em 2020, um aumento proporcional de 572% (635 km²) (Figura 4.11). As novas áreas de cultivo de soja se concentram, principalmente, na região do planalto santareno, próximas a áreas de cultivo já existentes no ano de 2004. Contudo, também há presença de novas áreas de cultivo na porção sul da região de Santarém, próximas à BR-163 e à Flona Tapajós, e ao longo da rodovia PA-370. A expansão da soja nessa localidade pode estar associada à pavimentação do trecho da BR-163 que atravessa essa região. Ao longo da PA-370, nos limites dos municípios de Santarém e Mojuí dos Campos, também se observou a presença de novas áreas de cultivo de soja. A expansão dos cultivos ao longo desses dois importantes eixos logísticos reforçam o papel da infraestrutura logística no processo de expansão da soja na região. Ambas as rodovias estão atualmente pavimentadas e têm como destino o porto de Santarém, utilizado no escoamento da produção.

Figura 4.11 – Expansão das áreas de cultivo de soja entre 2004 e 2020 na região de Santarém.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.12 –Expansão do cultivo de soja próximo da BR-163 (A) e da PA-370 (B).



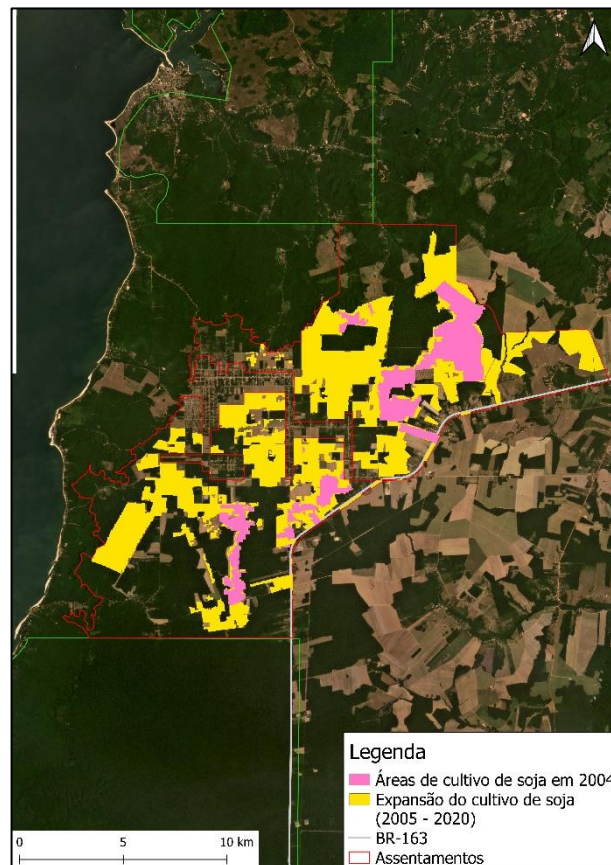
Fonte: Produção do autor.

Uma análise feita por Costa et al. (2021) sobre a infraestrutura atual da “Rota da Soja” entre Belém, Marabá e Santarém, no estado do Pará, mostra que a movimentação diária, nas duas principais vias que acessam os portos do norte, a BR-163 e a BR-158 (que liga Redenção, PA, à Santana do Livramento, RS) é de 125 e 32 caminhões de soja, respectivamente. Segundo Pessoa e Nascimento (2022), o fluxo anual de carga de soja na Microrregião de Santarém depende do crescimento local desta produção, conforme a área colhida e a quantidade produzida nos Municípios de Santarém, Belterra e Mojuí dos Campos.

Além disso, também observam-se novas áreas de cultivo de soja em áreas de Projetos de Assentamento. Em 2004 havia 18.77 km² de área plantada de soja em áreas de assentamento, se concentrando apenas no PAC Bela Terra I e PAC Bela Terra II. Em 2020 a área de cultivo cresceu para 110 km² e se expandiu em outros 7 assentamentos da região. Os assentamentos o Bela Terra I e II em 2020 passaram a apresentar 71 km² de áreas de cultivo de soja, representando cerca de 71% do total de área de soja em assentamentos na região. Os dois assentamentos estão localizados no entorno do perímetro urbano do

município de Belterra. Em 2022, o INCRA publicou a portaria nº 1.953, de 22 de setembro de 2022, que extingue ambos os assentamentos.

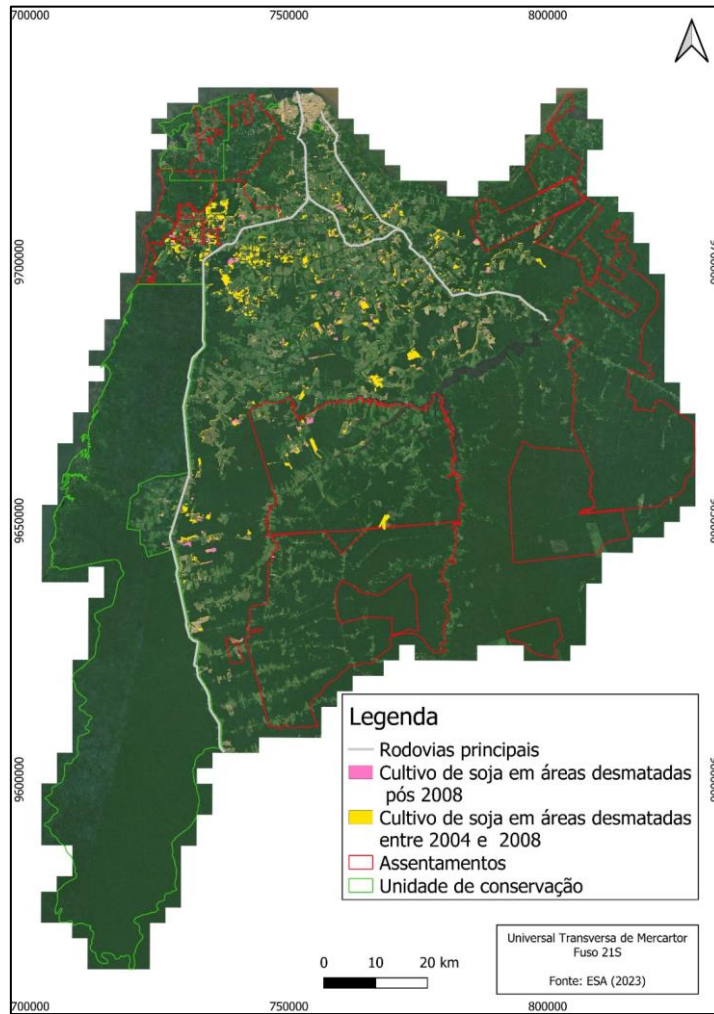
Figura 4.13 –Expansão das áreas de cultivo de soja nos assentamentos PAC Bela Terra I e PAC Bela Terra II.



Fonte: Produção do autor.

A maior parte das novas áreas de cultivo de soja se expandiu sob antigas áreas de pastagem, cerca de 48% (388 km²) da área total cultivada de soja em 2020. A conversão de áreas de Floresta para área de cultivo foi a segunda transição mais representativa no contexto da expansão da soja, cerca de 19% (154,5 km²) da área de soja cultivada em 2020 estava em áreas que foram desmatadas entre 2004 e 2020. Do total de área desmatadas para o cultivo de soja no período analisado, 78% (122 km²) está em áreas desmatadas até 2007, enquanto que 22% (32,5 km²) ocorreram em áreas desmatadas após 2008 e se encontram em desacordo com a moratória da soja.

Figura 4.14 –Expansão do cultivo de soja em áreas desmatadas 2004 e 2020.

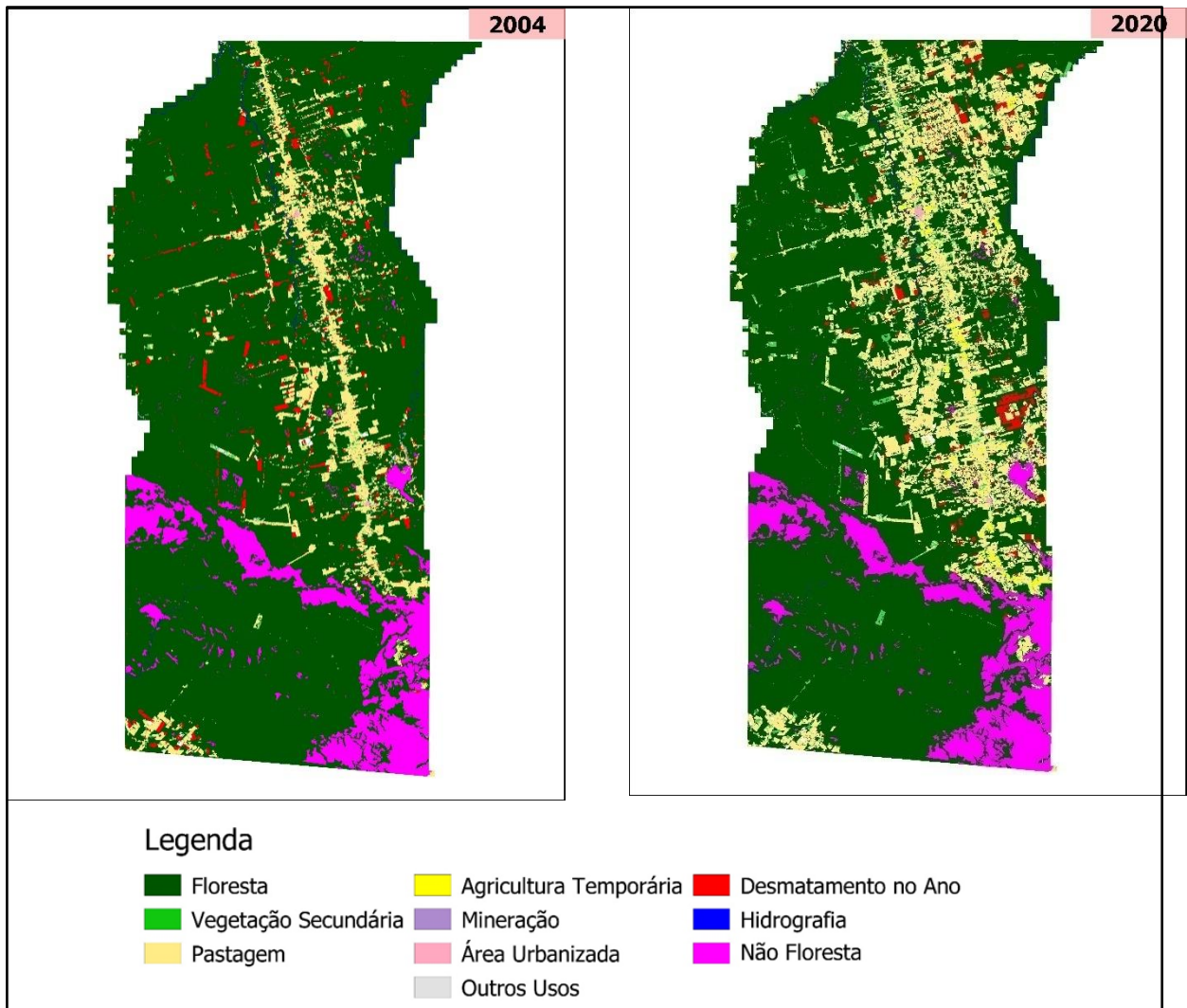


Fonte: Produção do autor.

4.2.2 Região de Novo Progresso

A Figura 4.15 apresenta os mapas de uso e cobertura da terra, gerados para a região de Novo Progresso. A Figura 4.16 apresenta a matriz de transição entre as classes para os anos de 2004 e 2020. A Tabela 4.2 apresenta as transições encontradas entre 2004 e 2020.

Figura 4.15 -Mapas de uso e cobertura da terra da Região de Novo Progresso para os anos de 2004 e 2020.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.16 -Matriz de transição de classes entre 2004 e 2020 na Região de Santarém.

		2020											
2004	Transições	Floresta	Vegetação Secundária	Pastagem	Mineração	Área Urbanizada	Outros Usos	Desmatamento no ano	Não Floresta	Hidrografia	Agricultura Semi Perene	Agricultura Temporária	Total
		Floresta	34554,77(84,92%)	748,53(1,84%)	4469,14(10,98%)	23,22(0,06%)	1,24(0%)	0(0%)	819,91(2,02%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	71,81(0,18%)
	Vegetação Secundária	0(0%)	332,51(52,56%)	280,19(44,29%)	7,34(1,16%)	1,59(0,25%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0,07(0,01%)	10,95(1,73%)	632,64(100%)
	Pastagem	0(0%)	367,71(10,44%)	2888,29(81,98%)	15,11(0,43%)	17,8(0,51%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	1,22(0,03%)	233,03(6,61%)	3523,16(100%)
	Mineração	0(0%)	0(0%)	0(0%)	24,53(100%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	24,53(100%)
	Área Urbanizada	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	14,17(100%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	14,17(100%)
	Outros Usos	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	15,9(100%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	15,9(100%)
	Desmatamento no ano	0(0%)	150,93(14,19%)	891,5(83,82%)	2,56(0,24%)	0,49(0,05%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	18,11(1,7%)	1063,59(100%)
	Não Floresta	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	4089,26(99,99%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	4089,55(100%)
	Hidrografia	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	139,48(100%)	0(0%)	0(0%)	139,48(100%)
	Total	34554,77	1599,68	8460,60	1,29	333,90	73,04	35,28	15,90	819,91	4089,26	139,48	50191,65

Fonte: Produção do autor.

Tabela 4.2 - Áreas total e relativa das classes nos anos de 2004 e 2020 na Região de Novo progresso.

Classe	2004		2020	
	Km ²	(%)	Km ²	(%)
Floresta	40688,62	81,1%	34554,77	68,85%
Vegetação Secundária	632,64	1,3%	1599,68	3,19%
Pastagem	3523,16	7,02%	8460,60	16,86%
Agricultura Temporária	0	0,00%	333,90	0,67%
Agricultura Semi Perene	0	0,00%	1,29	0,00%
Minação	24,53	0,05%	73,04	0,15%
Área Urbanizada	14,17	0,03%	35,28	0,07%
Outros Usos	15,90	0,03%	15,90	0,03%
Não Floresta	4089,55	8,15%	4089,55	8,15%
Hidrografia	139,48	0,28%	139,48	0,28%
Desmatamento no Ano	1063,59	2,12%	888,44	1,77%

Fonte: Produção do autor.

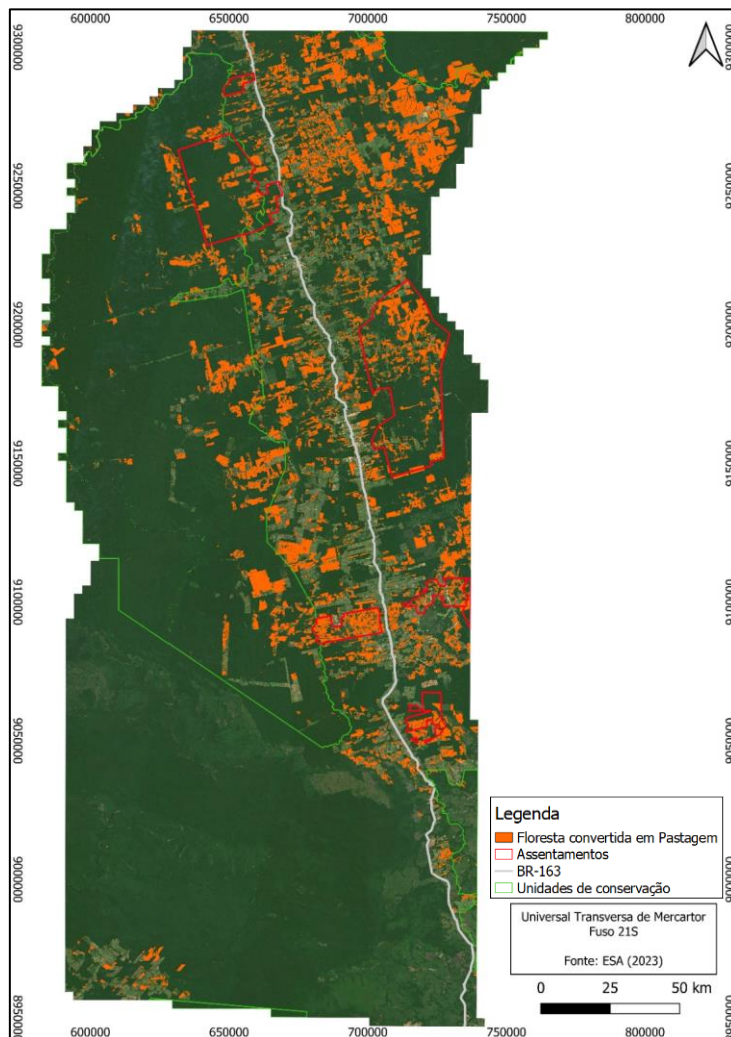
A área total da classe *Floresta* recuou 15% (6.134 km²) entre os anos de 2004 e 2020. Esse intenso processo de desmatamento pode ser explicado, principalmente, pela conversão de floresta para pastagem visando o mercado de terras e parte pela atividade madeireira na região em meados dos anos 2000. Em 2004, o município de Novo Progresso possuía o 3º maior incremento de desmatamento entre os municípios da Amazônia legal (INPE, 2023). Mesmo com a intensificação das políticas de comando e controle na região, Novo Progresso ainda figura entre os municípios com maior taxa de desmatamento em 2020, ocupando a 5ª colocação entre os municípios da Amazônia legal.

Dos 6.134 km² de floresta desmatada, 4.469 km² (72%) foram convertidos para pastagem no ano de 2020 (Figura 4.17). A pecuária se configura entre as principais atividades econômicas da região (DAL'ASTA et al., 2011). Contudo, no município de Novo Progresso o aumento da pastagem não está diretamente relacionado com a demanda por terras para pasto, o rebanho bovino não acompanha o crescimento das áreas de pastagem, indicando que as essas terras desmatadas podem estar sendo utilizadas para a especulação fundiária (MACUL, 2019). Um fato que corrobora esta hipótese é a proximidade das áreas

desmatadas com a BR-163, a qual passou por obras de pavimentação durante o período de análise e que atualmente encontra-se completamente pavimentada até o porto de Miritituba, localizado às margens do Rio Tapajós.

Também é possível analisar a presença dessa transição dentro dos limites da Flona Jamaxim. A Flona foi criada em 2006 dentro do contexto do plano BR-163 Sustentável, contudo, a falta de soluções para as ocupações previamente existentes dentro do limite desta unidade de conservação comprometeu a sua efetivação. Em 2010 a Flona possuía aproximadamente 55 imóveis registrados no CAR, sendo que 67% (36) foram registrados após a sua criação. Entre 2010 e 2012 é observada uma diminuição das taxas de desmatamento no local, devido a operações do IBAMA ocorridas entre 2008 e 2009, como a Boi Prata, que culminou em 150 embargos na Flona (MARTINS; RIBEIRO; SOUZA JR., 2017). Após 2012, é verificado um aumento nas taxas de desmatamento nesta unidade de conservação e um aumento nos registros de imóveis rurais do CAR dentro da Flona, saltando de 55 em 2010 para 352 em 2016. O aumento no número de imóveis nos limites da Flona, refletiu em uma tentativa de legalização das ocupações por meio da Medida Provisória 756/2016, que propõe a recategorização de 37% da área total da Flona para a categoria de Área de Proteção Ambiental (APA), que possui um nível menor de restrição, aceitando, por exemplo, a existência de propriedades privadas em seu interior (OLIVEIRA, 2019).

Figura 4.17 - Áreas de Floresta convertidas em Pastagem entre 2004 e 2020 na região de Novo Progresso.



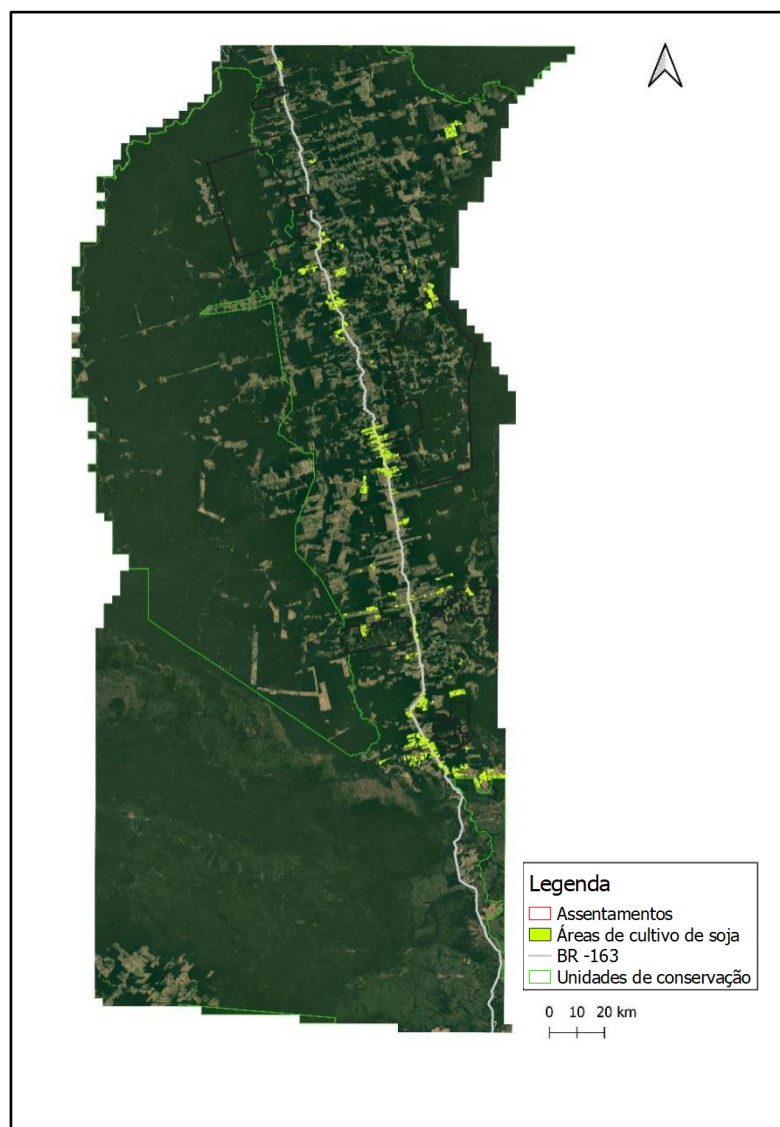
Fonte: Produção do autor.

A área da classe *Vegetação Secundária* aumentou de 632,6 km² em 2004 para 1.599,7km² em 2020. Dentro do contexto da região de Novo Progresso, esse aumento pode estar atrelado ao abandono de áreas de pastagens mais antigas ou mesmo o abandono após o desmatamento, ambos os casos podem estar associados ao processo de reserva de terra para a especulação fundiária (COSTA, 2016). Outro fator que pode estar associado ao aumento da proporção da vegetação secundária, é o processo de degradação florestal associado à atividade madeireira na região (PINHEIRO, 2015)

Em 2020, o cultivo da soja se estendia por 333,9 km² (Figura 4.18). A maior parte da soja substituiu antigas pastagens, cerca de 233 km² (69%), e também áreas desmatadas entre

2004 e 2020, com aproximadamente 90 km² (26%). É possível observar na Figura 4.19 que grande parte das áreas de cultivo de soja se localiza próxima à BR-163. Após a finalização das obras de pavimentação em 2019, essa estrada se tornou uma rota de fácil acesso para o porto de Miritituba, onde inúmeros portos graneleiros foram construídos.

Figura 4.18 – Áreas de expansão do cultivo de soja em Novo Progresso.



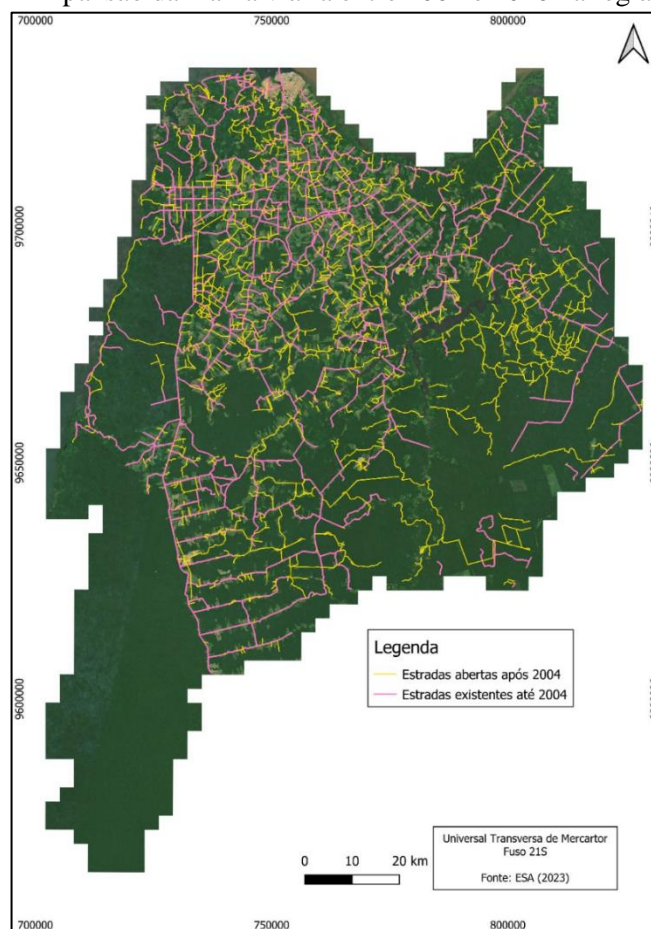
Fonte: Produção do autor.

4.3 Análise das variáveis de tempo de viagem

4.3.1 Resultados da atualização das malhas viárias

A Figura 4.19 apresenta as estradas atualizadas até o ano de 2020, diferenciando as estradas existentes até o ano de 2004 e o incremento observado até o ano de 2020 na região de Santarém. Em 2004 a malha viária apresentava 2.477 km, enquanto em 2020 o comprimento total estimado da malha viária foi de 5.114 km, um aumento observado de 2.637 km (106%). Observando o mapa da Figura 4.20, nota-se que na região no planalto santareno, onde se concentra a maior parte das áreas de cultivo de soja, a expansão das estradas aconteceu, no geral, a partir de estradas vicinais já existentes. Nas regiões sul e leste é possível notar o surgimento de aglomerados de novas estradas abertas em locais que não possuíam estradas vicinais em 2004, indicando a abertura de novos vetores de ocupação nesses locais.

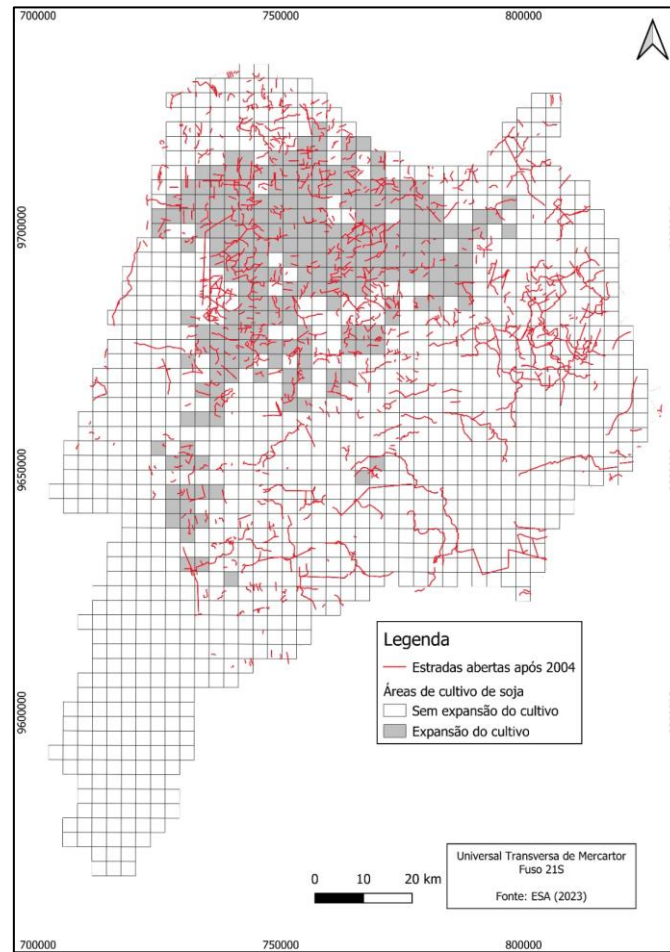
Figura 4.19 – Expansão da malha viária entre 2004 e 2020 na região de Santarém.



Fonte: Produção do autor.

Em 242 células de 3x3 km onde foi verificada a expansão do cultivo da soja, observou-se um incremento na malha viária de 832 km, um aumento de 88% em relação à extensão da malha viária de 2004, que era de 935 km (Figura 4.20). Nas demais células, em que não ocorreu o processo de expansão da soja, também foi verificado um incremento proporcional de 117% (1.805 km) no comprimento total das estradas entre os anos de 2004 e 2020. A diferença verificada no incremento proporcional do comprimento das estradas pode ser explicada pelo fato de que a expansão da soja ocorreu próxima a cultivos já existentes em 2004, locais onde já havia uma boa rede de estradas. Como o processo de expansão da soja não é concomitante com a abertura de estradas, principalmente se considerarmos que grande parte dessas novas estradas não são pavimentadas, o aumento dessa capilaridade na região pode significar o aumento de eixos futuros de expansão da soja. No Mato Grosso, na região de Sinop, Capanema (2017) verificou o aumento de estradas vicinais concomitante ao aumento de áreas de soja, de acordo com o autor, essas novas estradas são utilizadas, em grande parte, para o escoamento da produção de soja. Essa região, encontra-se em um estágio de ocupação mais consolidado do que a região de Novo Progresso.

Figura 4.20 – Expansão da rede viária entre 2004 e 2020 nas células onde ocorreu a expansão do cultivo da soja.



Fonte: Produção do autor.

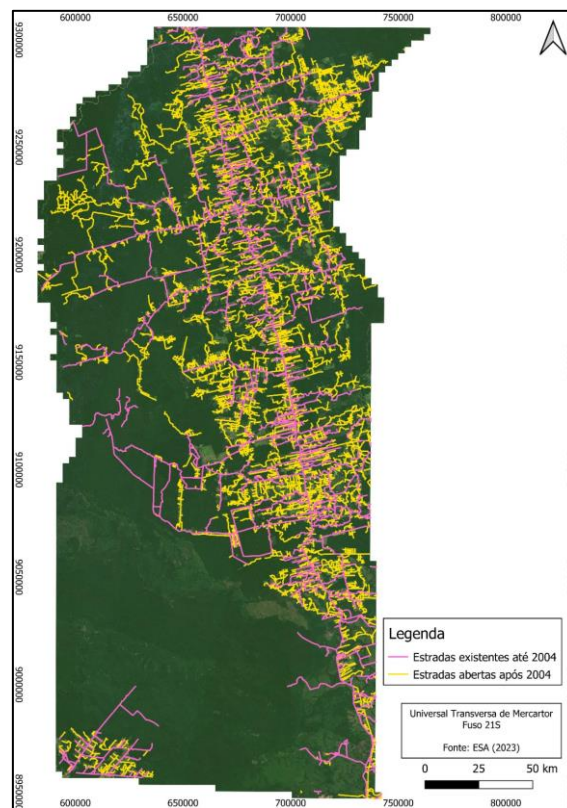
Na Figura 4.22 são apresentadas as estradas existentes até 2004 e o incremento entre 2004 e 2020 na região de Novo Progresso. No ano de 2004 o comprimento total da malha viária correspondia à 5.351 km em 2004 e, em 2020, esse valor aumenta para 17.174 km, um incremento de 11.823 km (220%). Observando a Figura 4.22 é possível verificar que os incrementos na malha viária ocorrem de forma bem distribuída ao longo de toda a região de Novo Progresso, próximos às estradas já existentes em 2004. É possível também notar a abertura de novas estradas dentro dos limites da Flona Jamanxim, evidenciando o processo de ocupação irregular dentro dos limites da unidade de conservação (Figura 4.21).

Figura 4.21 - Estrada que corta a Flona Jamanxim.



Fonte: LISS (2017).

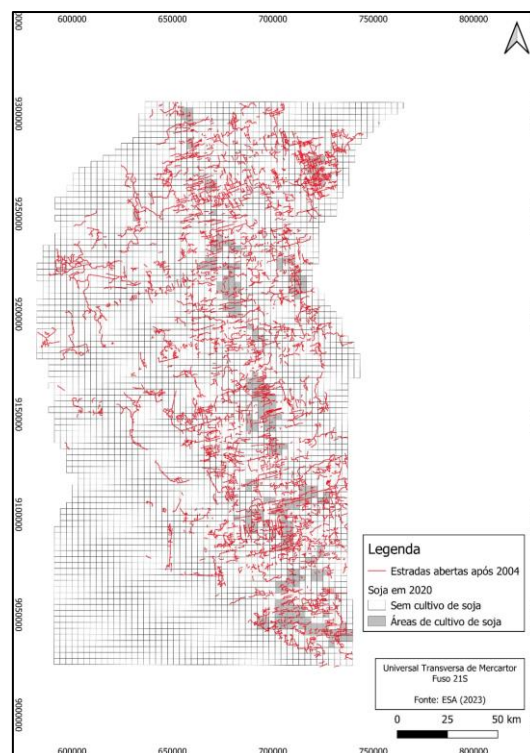
Figura 4.22 – Expansão da malha viária entre 2004 e 2020 na região de Novo Progresso.



Fonte: Produção do autor.

Na região de Novo Progresso, foram identificadas 158 células onde há presença de cultivo de soja no ano de 2020 (4.23). Neste conjunto de células foi verificado que em 2004 o comprimento total da malha viária era de 530 km, aumentando para 1.376 km em 2020, totalizando um incremento de 846 km (159%). Embora a proporção de incremento tenha sido alta, as novas estradas abertas são continuações das estradas já existentes em 2004.

Figura 4.23 – Expansão da rede viária entre 2004 e 2020 nas células onde ocorreu a expansão do cultivo da soja.



Fonte: Produção do autor.

O incremento proporcional da malha viária entre 2004 e 2020, verificado nas células com presença de cultivo de soja em Novo Progresso (159%), foi maior que o verificado nas células onde ocorreu expansão do cultivo de soja em Santarém (88%). Como a região de Novo Progresso possui um processo de ocupação mais recente se comparada à região de Santarém, sua rede viária ainda não estava ainda estabelecida no ano de 2004, sendo ampliada conforme o surgimento de novas frentes de ocupação. Na região de Santarém,

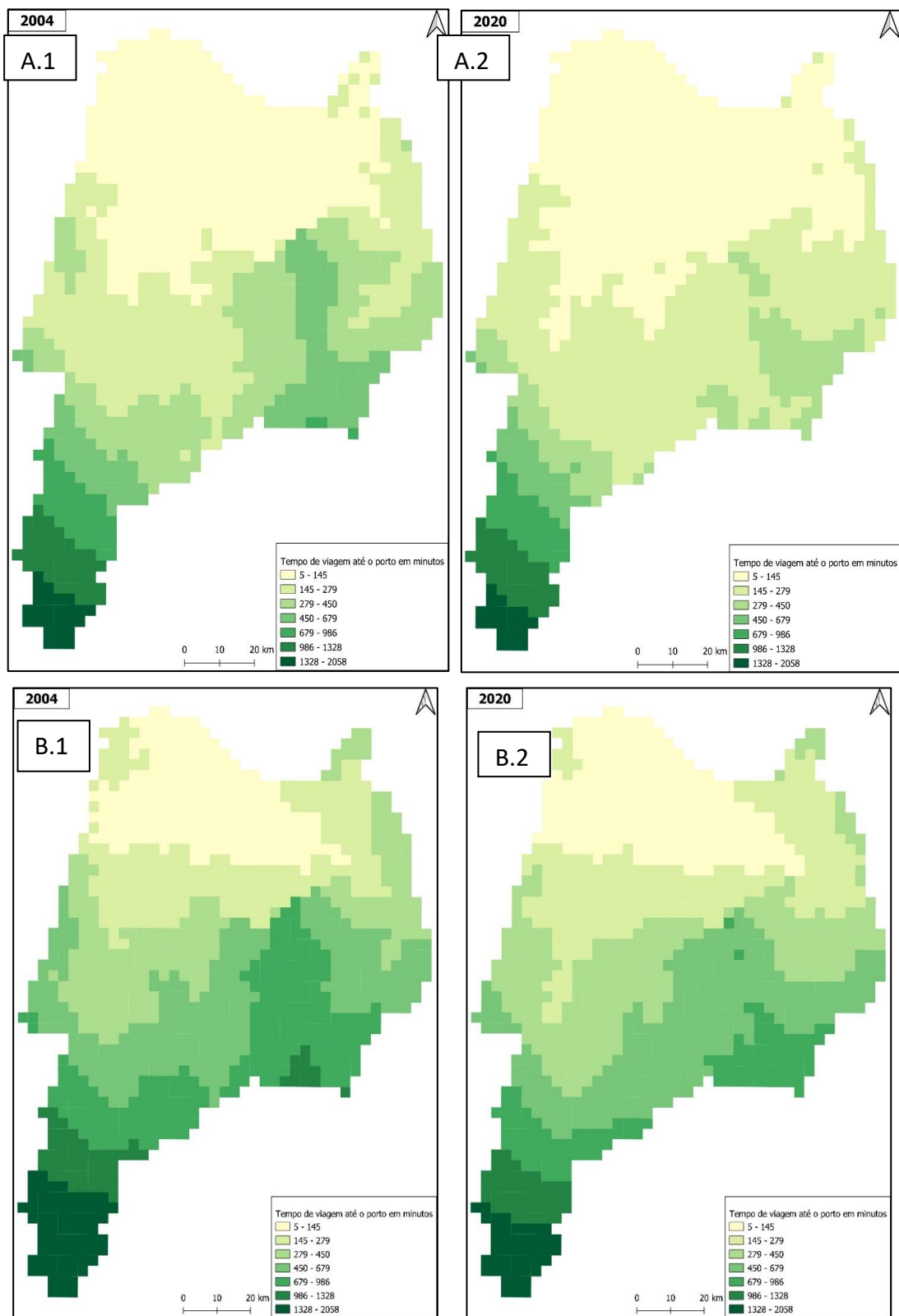
o cultivo de soja já ocorria desde 2004 em uma área de ocupação mais antiga, já apresentando uma rede de estradas que garantia acesso rápido à BR-163 e aos portos. O início do cultivo da soja em Novo progresso é mais recente, ganha maior importância a partir de 2014, e ocorre próximo da BR-163, mas também em áreas que antes não possuíam uma rede viária tão bem estabelecida.

4.3.2 Estimativa de tempo de viagem

Os mapas relativos à variável mediana de tempo de viagem gerado para a região de Santarém no período seco são apresentados na Figura 4.24. A.1, juntamente com os histogramas, contendo a distribuição e a frequência dos valores nas células, que podem ser visualizados na Figura 4.25.A.1 para o ano de 2004 e, Figura 4.25.A.2 para o ano de 2020. Nesses mapas é possível observar que em 2004 e 2020 a porção central da área de estudo, o planalto santareno, é a região com menor tempo de viagem até o porto. Isso se deve à proximidade geográfica do porto, somada à proximidade das principais rodovias (BR-163, PA-370 e PA- 431) e da rede de estradas vicinais bem consolidadas. As áreas com o maior tempo de viagem correspondem à porção do extremo sul da região, dentro dos limites da Flona Tapajós, onde há uma menor densidade de ocupação humana. Na porção centro sul da região foi encontrados valores medianos de tempo de viagem. Nesses locais há uma rede de estradas vicinais que está em processo de expansão e consolidação, devido ao aumento da ocupação, principalmente dentro dos assentamentos.

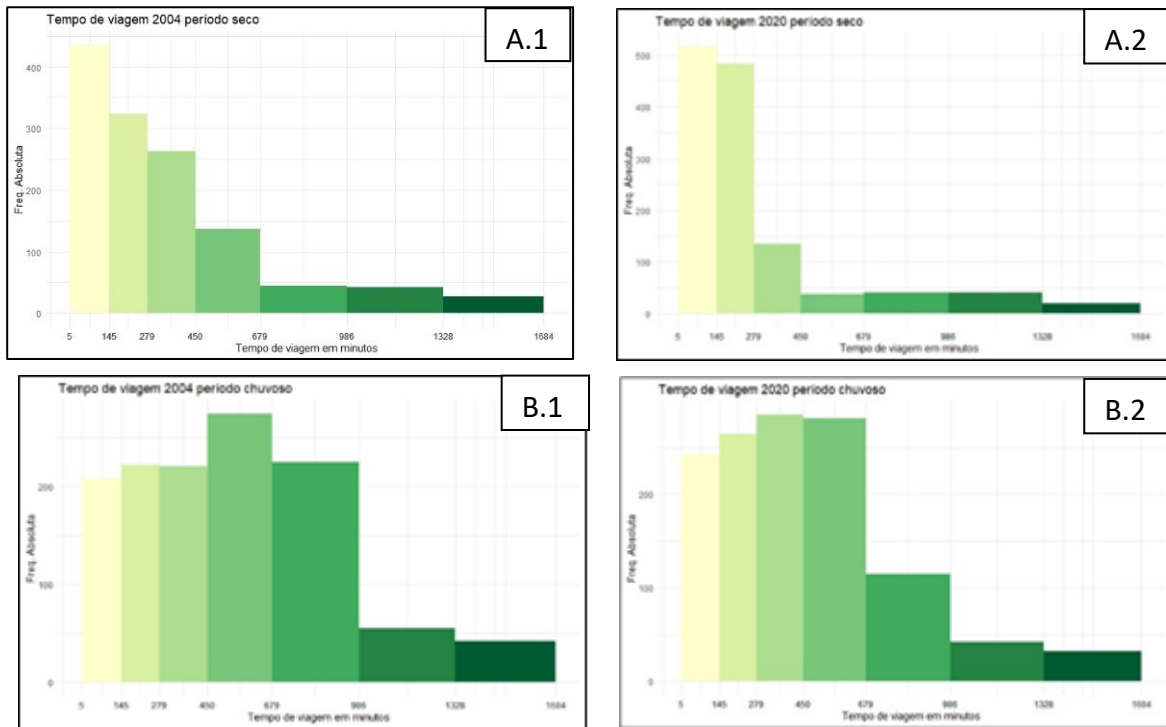
A partir de uma análise comparativa entre os mapas e gráficos dos dois anos, é possível observar que houve uma redução do tempo de viagem em 2020, principalmente, nas regiões centro-sul e sul da área de estudo. Essa melhora pode estar atrelada à pavimentação de parte da BR-163 na porção sul da região de Santarém, entre 2004 e 2020, além da abertura de novas estradas vicinais na localidade. A região do planalto santareno não apresenta reduções drásticas no tempo de viagem, pois nessa localidade a infraestrutura logística sempre foi melhor que a verificada no restante da região de Santarém.

Figura 4.24 – Mapas da variável de tempo de viagem até o porto, em 2004, no período seco (A1) e no período chuvoso (B1), e em 2020 no período seco (A2) e período chuvoso (B2) na região de Santarém.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.25 – Histograma de distribuição da variável de tempo de viagem no período seco em 2004 (A.1) e no período chuvoso (B.1) e em 2020 no período seco (A.2) e chuvoso (B.2), para a região de Santarém.



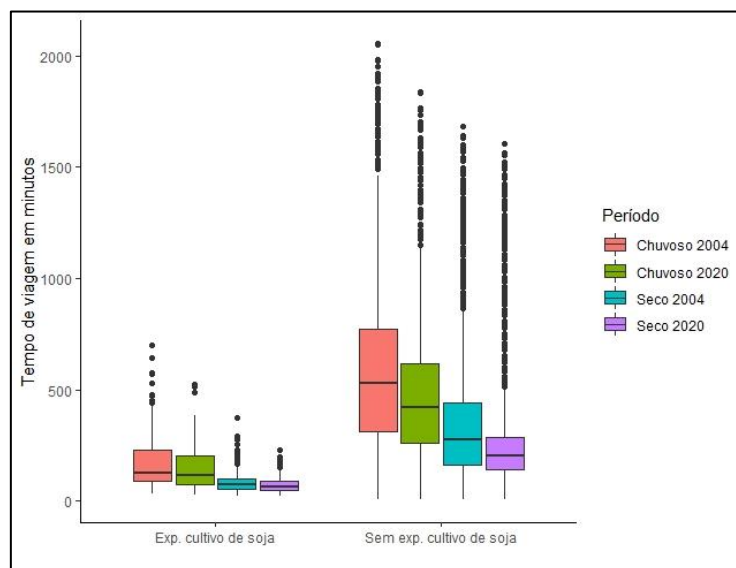
Fonte: Produção do autor.

As Figuras 4.24.B e 4.25.B apresentam respectivamente os mapas e os histogramas de distribuição das variáveis de tempo de viagem no tempo chuvoso. No geral, os mapas indicam que no período chuvoso a variação do tempo de viagem na grade apresenta um comportamento semelhante ao verificado no período seco, com os menores tempos de viagem concentrados na região do planalto santareno e os maiores na porção sul da área de estudo. Contudo, como observado nos histogramas apresentados na Figuras 4.25.B.1 e 4.25.B.2, a distribuição das células nos primeiros dois intervalos (onde estão os menores tempo de viagem) apresenta um número menor de células se comparado ao verificado no período seco. Isso era esperado, pois no período chuvoso apenas as rodovias principais pavimentadas têm a velocidade de deslocamento mantida em relação ao período seco, nas demais vias e nas classes de uso e cobertura a velocidade de deslocamento é reduzida.

No trabalho de Schieleinet al. (2021), foi evidenciado que as áreas de cultivo de soja tendem a se estabelecer em locais com boas condições de acessibilidade até portos ou silos durante todo o ano. No contexto do cultivo da soja na Amazônia, esse fator é

importante, pois a colheita ocorre no fim do período chuvoso, e o tráfego em vias sem pavimentação pode trazer riscos de perdas da produção durante o transporte. Analisando a Figura 4.26, observa-se que nas células onde ocorreu a expansão do cultivo de soja, o valor médio e mediano do tempo de viagem é menor em todos os cenários analisados. Desta forma, é possível supor que as áreas de cultivo de soja na Região de Santarém estão dispostas em locais com boas condições de tráfego até o porto, tanto no período seco quanto no chuvoso, indo de encontro com os resultados observados em outros trabalhos que analisam a relação entre o cultivo de soja na Amazônia e a infraestrutura logística (FREY et al., 2018; VERA-DIAZ et al., 2008). Além disso, é observado que nas áreas de expansão de soja, o tempo de viagem se altera pouco entre 2004 e 2020, indicando que a soja se expandiu em locais que sempre apresentavam melhores condições de acessibilidade aos portos.

Figura 4.26 – Distribuição da variável de tempo de viagem na região de Santarém.

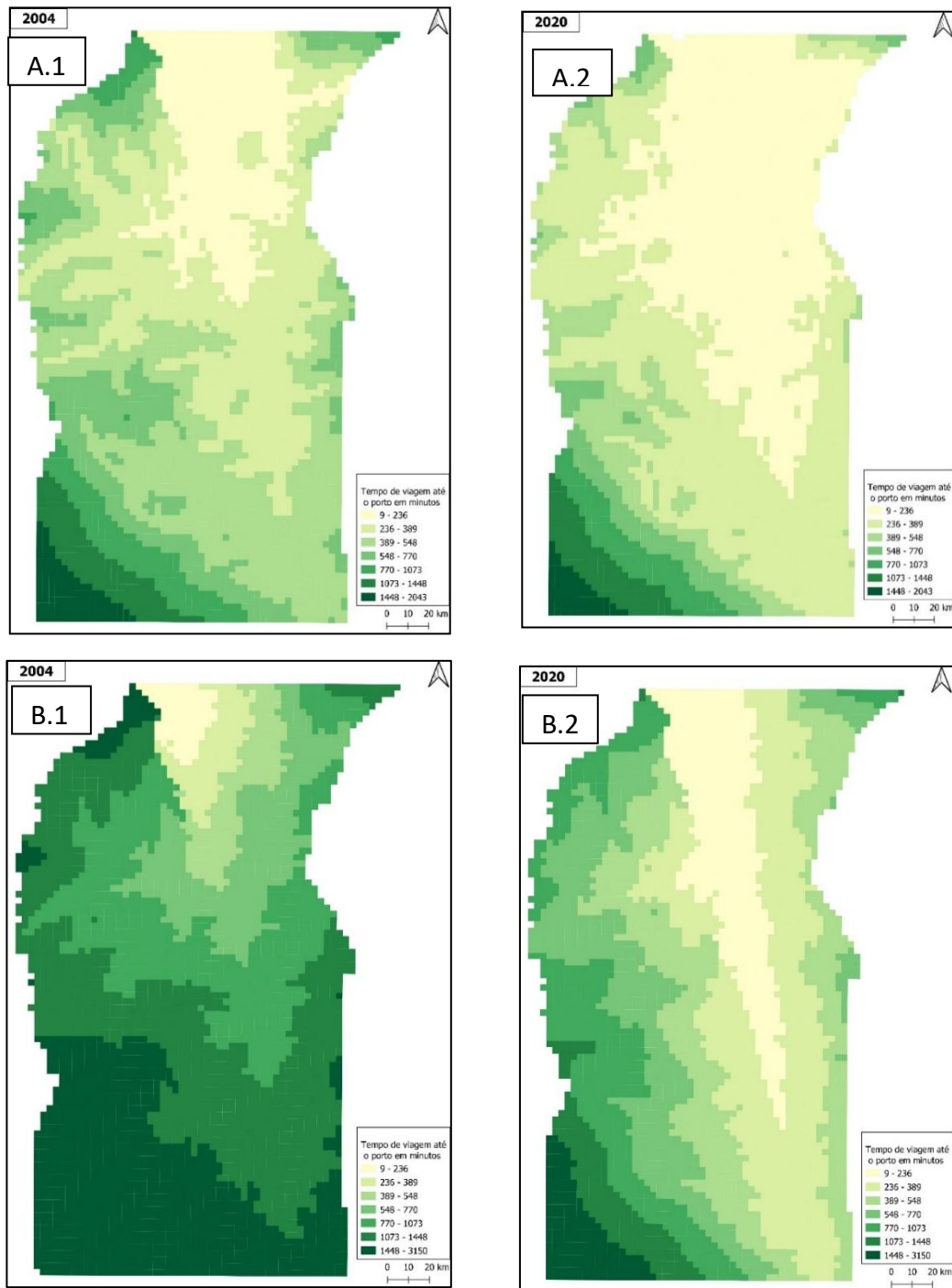


Fonte: Produção do autor.

As Figuras 4.27.A e 4.28.A apresentam o resultado das variáveis de tempo de viagem no período seco, nos anos de 2004 e 2020, no município de Novo Progresso. No geral, em ambos os anos, os menores valores se concentram ao longo da BR – 163, principal rodovia da região, enquanto que os maiores valores se concentram no extremo sudoeste. É possível observar que dentro dos limites da Flona Jamanxim existem alguns *cluster* de

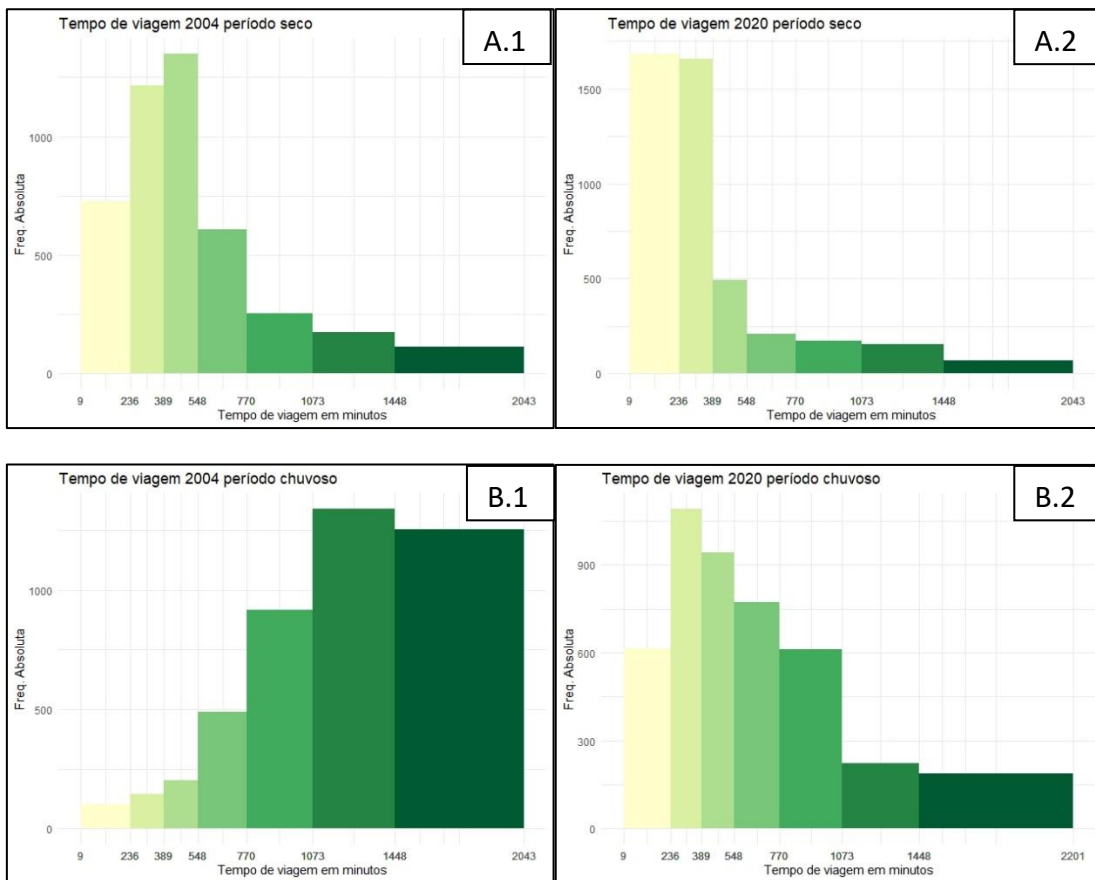
células com tempo de viagem baixos, isso se deve à presença de estradas vicinais nas áreas abertas, nos ciclos de ocupações irregulares que aconteceram na unidade de conservação (MARTINS; RIBEIRO; SOUZA JUNIOR., 2017). Realizando uma análise comparativa entre 2004 e 2020 é possível observar uma redução considerável no tempo de viagem na região como um todo, isso se deve à pavimentação da BR-163, sendo que essa redução é mais acentuada nas proximidades da rodovia.

Figura 4.27 –Mapas da variável de tempo de viagem até o porto, em 2004, no período seco (A1) e no período chuvoso (B1), e em 20020, no período seco (A2) e no período chuvoso (B2), na região de Novo Progresso.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.28 – Histograma de distribuição da variável de tempo de viagem até o porto, em 2004, no período seco (A1) e no período chuvoso (B1), e em 2020, no período seco (A2) e período chuvoso (B2), na região de Novo Progresso.



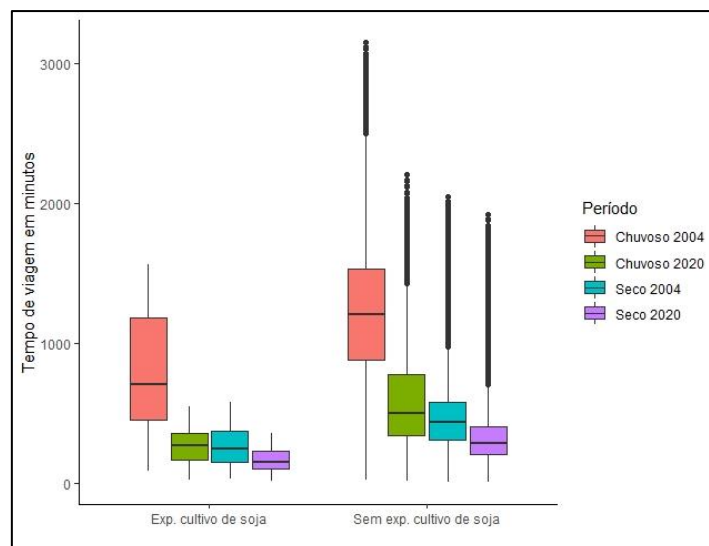
Fonte: Produção do autor.

Nas Figuras 4.26.B são apresentados os mapas resultantes das variáveis de tempo de viagem no período chuvoso, enquanto que nas Figuras 4.28.B.1 e 4.28.B.2 são apresentados os histogramas de distribuição das variáveis em 2004 e 2020, respectivamente. No período chuvoso de 2004, observa-se que toda a região apresenta valores altos no tempo de viagem, como demonstrados nos mapas e histograma. Diferente da região de Santarém, onde em 2004 apenas uma parcela da BR-163 não apresentava pavimentação, na região de Novo Progresso a rodovia não possuía trechos pavimentados nesta data, o que dificultava o escoamento de soja, em grande parte, produzida no estado no Mato Grosso. Contudo, em 2019, o plano de pavimentação da BR-163 é concluído, finalizando o corredor de escoamento da produção de soja oriunda do estado do Mato Grosso até o porto de Miritituba (BARROS, 2019). Nas áreas próximas a BR-163 são

observados valores de tempo de viagem semelhantes ao verificado no período seco, indicando que nesses locais há uma boa condição de tráfego durante todo o ano, favorecendo o cultivo da soja nesses locais.

A Figura 4.29 apresenta as estatísticas descritivas da variável de tempo de viagem nas células onde há áreas de cultivo de soja e nas células sem a presença de cultivo de soja. Diferente do que foi observado em Santarém, as áreas de cultivo de soja têm valores medianos e médios de tempo de viagem próximos aos verificados nas áreas com ausência do cultivo. Nos períodos seco e chuvoso no ano de 2004 os valores médios e medianos das células, com e sem a presença de cultivo de soja, são bastante semelhantes, e isso ocorre devido à falta de pavimentação da BR-163 que faz com que quase toda a região possua altos valores de tempo de viagem. Embora no ano de 2020, nos períodos seco e chuvoso, haja certa diferença entre as áreas com e sem cultivo, os valores são bastante próximos, diferente do observado em Santarém. Embora estejam afastadas geograficamente do porto, as áreas de cultivo de soja estão em locais onde o tempo de viagem em 2020, nos períodos seco e chuvoso, apresentam pouca variabilidade, o que indica que há boas condições de acessibilidade ao porto de Miritituba ao longo de todo o ano, tais condições não ocorrem em áreas mais distantes da BR-163.

Figura 4.29 - Distribuição da variável de tempo de viagem na região de Novo Progresso.



Fonte: Produção do autor.

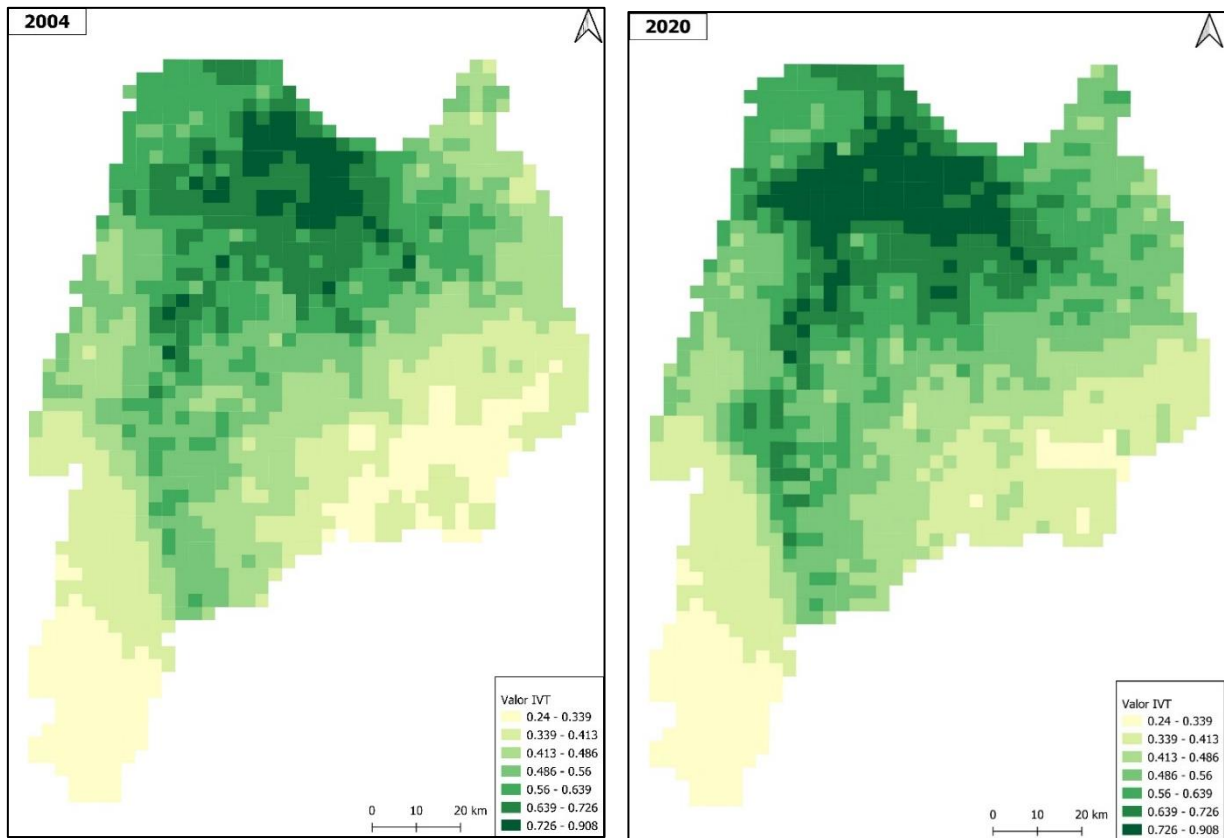
4.4 Geração e análise do índice de Valorização da Terra - IVT

A Figura 4.30 apresenta os mapas para os índices calculados em 2004 e 2020, enquanto que na Figura 4.31 é apresentado o histograma de distribuição para os dois anos. Em ambos os anos, os valores mais altos se concentram ao longo do traçado da BR-163 e na região do planalto Santareno. A região do planalto está próxima da BR-163, possui uma rede de estradas vicinais, apresenta uma topografia plana e a maior proporção das terras corresponde a “Terras para Pastagens” ou “Terras para Lavoura”. Portanto, os altos valores verificados na região do planalto Santareno refletem as características nesse local que favorece o desenvolvimento de atividades agropecuárias de larga escala.

Esta nomenclatura/conceito de “Terras com Mata”, “Terras de Pastagem” e “Terras de Lavoura” é apresentada em Costa (2011), que aponta estas 3 categorias da terra como mercadoria. O autor considera que para o mercado, as Terras com Matas são consideradas como componentes de formação de preços das pastagens e das terras agrícolas. Em 2015, Gayoso da Costa relata que crescimento da produção de soja tem mantido a valorização das terras na Amazônia Legal, notadamente naquelas regiões cuja produção de grãos pode ser considerada estabilizada e que possuem melhor infraestrutura de escoamento, onde o preço da terra se mantém ainda mais elevado. Também o avanço da fronteira de *commodities* na região Oeste do Pará, e nos municípios que fazem parte da Região Metropolitana de Santarém-RMS, tem servido de atrativo para a elevação do preço das terras e para o incremento de uma infraestrutura voltada a grandes projetos agrícolas, minerários e extrativos, atraindo novos investimentos para atender ao aumento dos níveis de exportação do país e às oportunidades geradas pelo aumento da demanda no mercado internacional de *commodities*, especialmente após os anos 2000 (Pessoa e Nascimento, 2022).

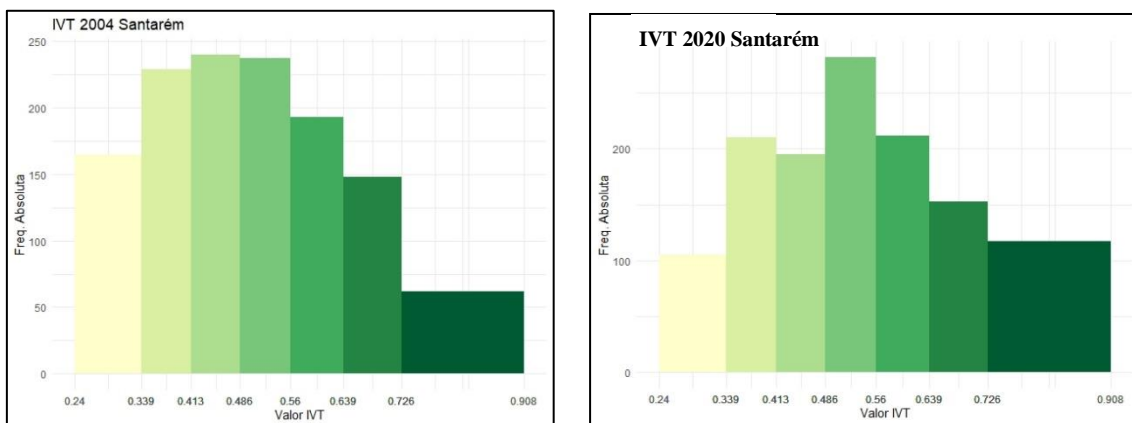
Em contrapartida, os menores valores se concentraram na região da Flona Tapajós e na porção sudeste da região, que correspondem a áreas pouco ocupadas, onde prevalece a cobertura florestal e há o desenvolvimento de atividades agroextrativistas.

Figura 4.30 - IVT nos anos de 2004 e 2020 na Região de Santarém.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.31 – Histograma de distribuição da variável IVT no ano de 2004.

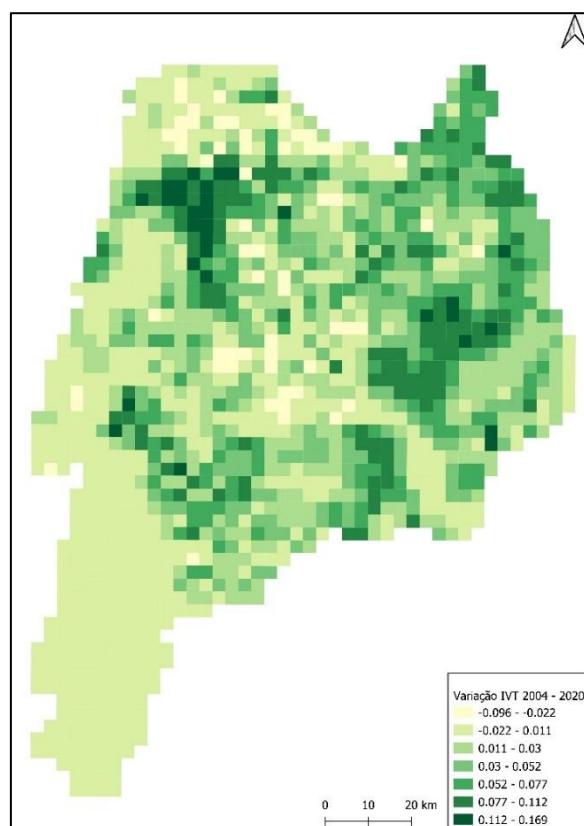


Fonte: Produção do autor.

Na Figura 4.32 é apresentado o resultado da variação do IVT entre 2004 e 2020. Observa-se que existem células com decréscimo do valor do IVT. Este processo ocorre em 65

células, 4% da grade regular, e está atrelado ao abandono de áreas de pastagens em 2004 que transicionam para a classe *Vegetação Secundária* em 2020. A variável *Área Aberta*, que engloba áreas de pastagens e de agricultura, é a variável que recebe o maior peso na construção do IVT, qualquer variação nela provoca uma diferença significativa no valor final do índice. É possível verificar que existem aglomerados de áreas de aumento positivo no IVT, que indicam valorização nos valores das terras, ao longo de toda a região de Santarém. Este aumento está atrelado ao aumento das áreas de pastagens nesses locais, acompanhado por uma redução da proporção de floresta e criação de novas vias vicinais. Destaca-se também a variação baixa do índice na região da Flona Tapajós, indicando que neste local as políticas foram eficazes em impedir a entradas de atividades agrícolas de larga escala que pudessem converter a cobertura florestal em áreas abertas, ou mesmo a abertura de novas vias viciais que pudessem servir como vetor para novas frentes de ocupação no local.

Figura 4.32 – Variação do IVT entre 2004 e 2020 em Santarém.

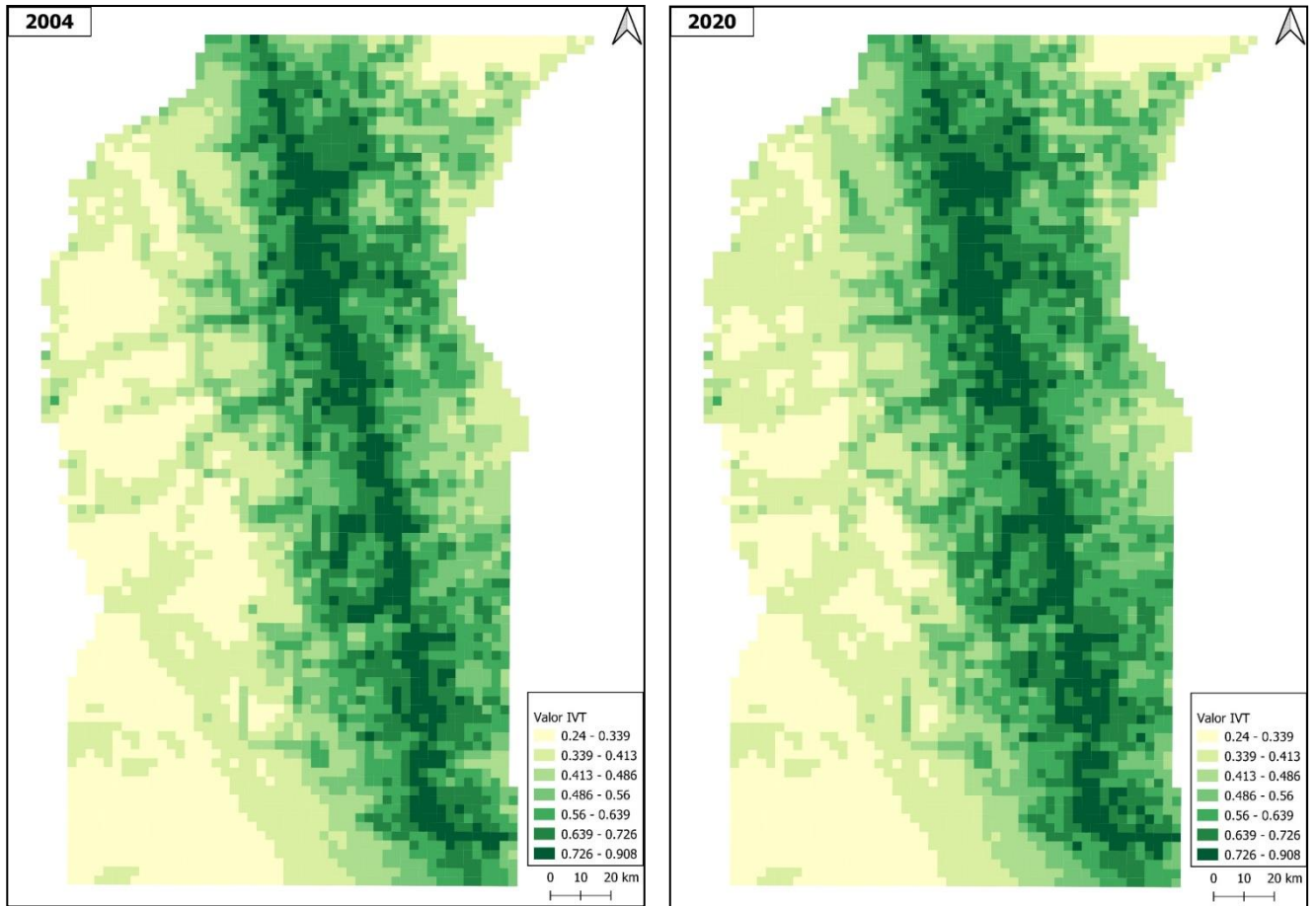


Fonte: Produção do autor.

Em média o valor do IVT de 2004 nos locais onde foi verificada a expansão do cultivo da soja foi de 0,6619, enquanto que a média do IVT para o mesmo ano, das demais áreas é de 0,4558. Em relação à variação dos valores nas áreas de expansão do cultivo de soja, foi verificado que em média o IVT variou 0,04711, enquanto que nas demais áreas a média da variação foi de 0,02468. A valorização nas células onde ocorreu o processo de expansão do cultivo se explica pelo aumento da proporção de área aberta e a abertura de novas vias vicinais nesses locais.

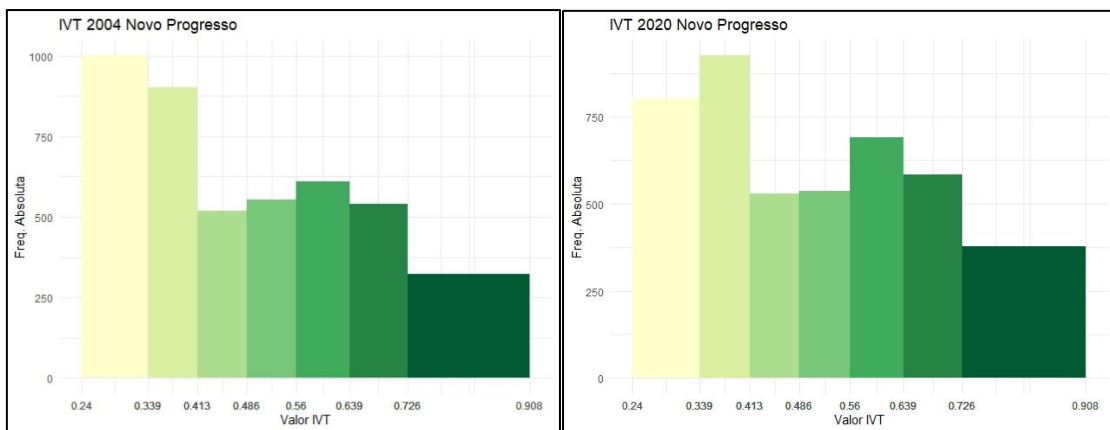
Na Figura 4.33 são apresentados os mapas do IVT calculados para os anos de 2004 e 2020 na região de Novo Progresso, enquanto que a Figura 4.34 apresenta os histogramas de distribuição para os anos de 2004 e 2020. Nos mapas é possível observar que os maiores valores se encontram dispostos ao longo da BR-163, enquanto que os menores valores são observados na parte esquerda região, dentro dos limites da Flona Jamanxim. Os maiores valores são explicados, principalmente, pela proximidade com a principal rodovia da região e pela alta proporção de áreas abertas ao longo do traçado da BR. A concentração de áreas abertas próximo a BR-163 está atrelada ao processo de especulação fundiária. O processo de desmatamento que dá origem às áreas abertas ocorreu devido à expectativa da conclusão das obras de pavimentação da BR-163, que traria consigo uma grande valorização das terras situadas em seu entorno. Além da pavimentação da BR, existe a expectativa da construção da ferrovia Ferrogrão, um dos projetos de infraestrutura voltados a melhorar o escoamento da produção agrícola do Centro-Oeste pelos portos do Arco Norte do país, que segue um traçado paralelo ao da BR-163 (COSTA et al., 2021). Já os menores valores do IVT se explicam pela ausência de uma rede de estradas vicinais densa, a alta proporção de áreas de floresta e a presença da Flona Jamanxim.

Figura 4.33 - IVT nos anos de 2004 e 2020 em Novo Progresso.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.34 - Histograma de distribuição da variável IVT nos anos de 2004.

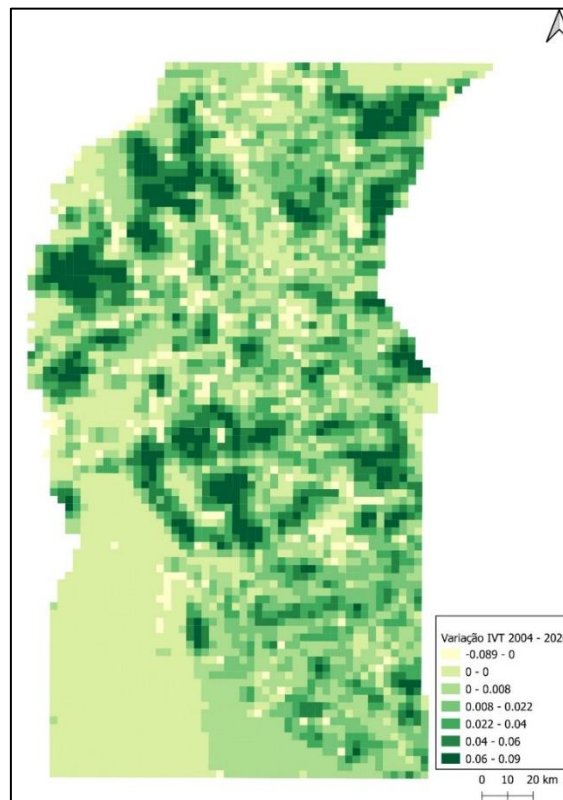


Fonte: Produção do autor.

Entre os anos de 2004 e 2020 ocorre o aumento do valor do IVT em alguns pontos da Região de Novo Progresso (Figura 4.35). Verifica-se que dentro dos limites da Flona Jamanxim existem *clusters* de áreas com alta valorização. Esse aumento no valor do IVT pode estar atrelado à abertura de estradas vicinais, ao desmatamento e à abertura de novas áreas de pastagens que ocorrem devido ao processo de ocupação irregular presente nesta unidade de conservação. Também é possível observar o aumento do valor do IVT em áreas que ficam ao lado direito da BR-163, áreas onde ocorre o cultivo de soja e outras atividades agrícolas de larga escala. Dentro dos limites da Flona Jamanxim são observados alguns locais onde o IVT se manteve entre os anos de 2004 e 2020, isso se deve a pouca interferência antrópica nessas áreas da unidade de conservação.

Assim como ocorreu na Região de Santarém, foi observado que em algumas células, o valor do IVT diminuiu entre 2004 e 2020. Na região de Novo Progresso foram observadas 187 células onde os valores decresceram e isto ocorreu devido ao processo de abandono das áreas abertas. O número superior de células com valor decrescente na região de Novo Progresso em relação à região de Santarém ocorre devido ao processo de ocupação recente em Novo Progresso, onde algumas áreas recém ocupadas são abandonadas sem manutenção e sem uma atividade econômica definida ou pelo embargo do local por órgão de fiscalização ambiental, quando a ocupação ocorre de forma irregular.

Figura 4.35 – Variação do IVT entre 2004 e 2020 em Novo Progresso.



Fonte: Produção do autor.

Em relação às áreas de cultivo de soja em 2020, em geral elas estão localizadas em células com alto valor de IVT em 2004 e 2020. Em 2004 o valor médio era de 0,7489, enquanto que em 2020 a média era de 0,7366. Assim como observado na região de Santarém, as áreas de cultivo de soja se localizam em locais onde os valores do IVT sempre foram altos. Contudo, os valores médios do IVT nas áreas de cultivo de soja em Novo Progresso se mostraram mais elevados que em Santarém.

4.5 Análise do modelo de regressão logística para a Região de Santarém

Uma vez construídas as variáveis de Tempo de Viagem e Índice de Valorização da terra, iniciou-se a etapa de desenvolvimento do modelo estatístico para avaliar os fatores associados à expansão do cultivo da soja. A Tabela 4.3 apresenta as variáveis selecionadas para compor o modelo após a análise de multicolinearidade entre as variáveis independentes e a seleção feita pelo método *stepwise*. No processo de seleção de variáveis foi adotado um nível de significância de 5%. Na Equação 4.1 é apresentado o modelo de

regressão logística. Na figura 4.36 é apresentado a espacialização do modelo de regressão, ao lado é apresentado as células onde correrão, ou não, a expansão do cultivo de soja.

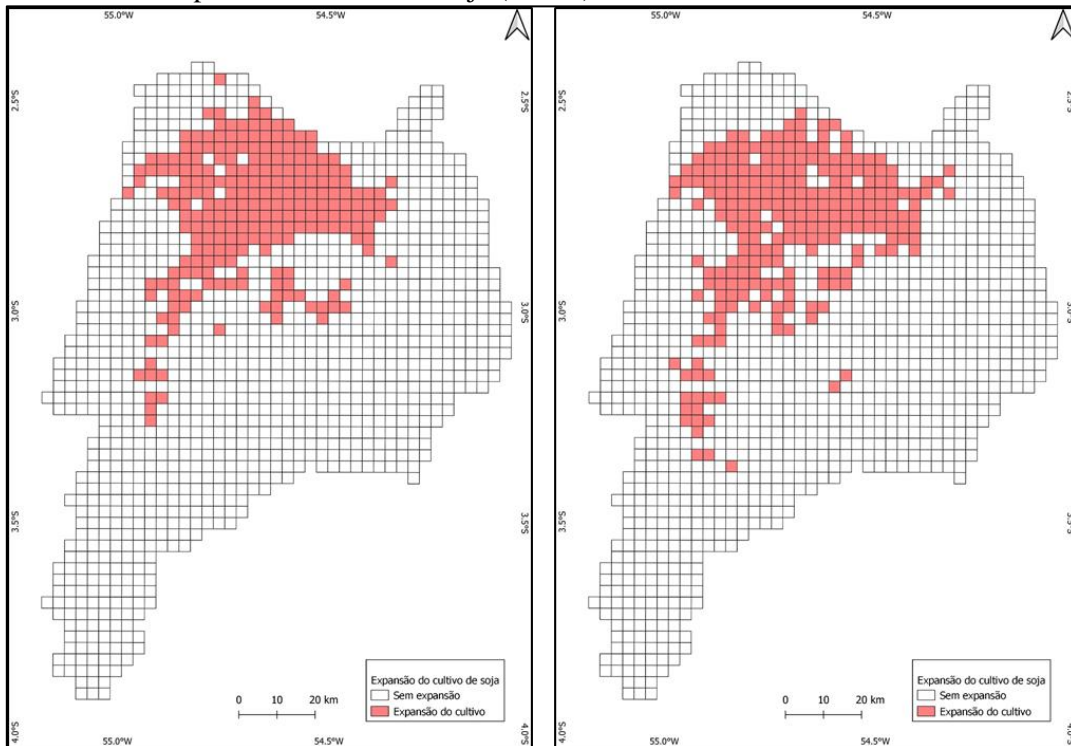
Tabela 4.3 – Coeficientes beta do modelo de regressão logística.

Variável	Beta	p-Valor
Intercepto	14,35	0.00650
IVT 2004	11,563	0,03101
Proporção de vegetação secundária em 2004 (VS2004)	4,092	0,02192
Diferença da proporção de áreas de Floresta entre 2004 e 2020 (DifFlr)	10,11499	0,0110
Tempo de viagem até o porto em 2004 no período chuvoso (TV2004)	- 0,007113	0,01856
Distância até as áreas de cultivo de soja já existentes em 2004 (Distsoj2004)	-0,000143	0,0340

Fonte: Produção do autor.

$$P = \frac{\varepsilon^{-14,35 + 11,563 * ivt2004 + 4,092 * VS2004 + 10,11499 * DifFlr - 0,007113 * TV2004 - 0,000143 * Distsoj2004}}{1 + \varepsilon^{-14,35 + 11,563 * ivt2004 + 4,092 * VS2004 + 10,11499 * DifFlr - 0,007113 * TV2004 - 0,000143 * Distsoj2004}} \quad (4.1)$$

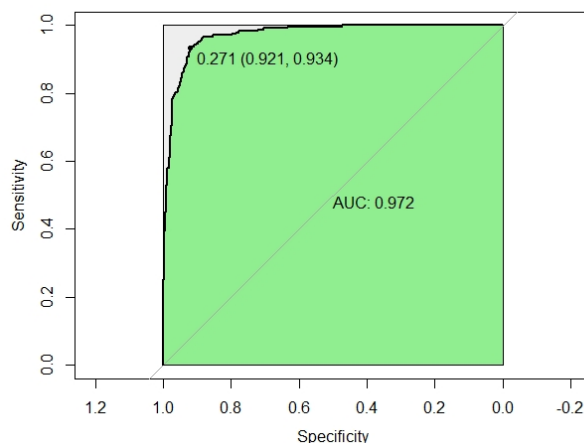
Figura 4.36 – Comparação do resultado do modelo de regressão logístico (esquerda) e áreas de expansão do cultivo de soja (direita).



Fonte: Produção do autor.

Com a seleção das variáveis e composição do modelo, foi executado o teste de Hosmer e Lameshow para verificar o ajuste do modelo. Os resultados encontrados no teste foram: estatística teste = 2,4413 e p-valor = 0,09644. O p-valor não foi significativo, pode-se considerar que o modelo está ajustado ao conjunto de dados. Em seguida foi realizada a análise da curva ROC e a da área sobre a curva (AUC). Na Figura 4.37 é apresentada a curva ROC e a área sob a curva calculada considerando as 107 amostras de validação selecionadas. O valor da AUC foi de 0,972, indicando que o modelo tem um bom poder discriminatório.

Figura 4.37 – Curva ROC e Área sob a curva (AUC) do modelo proposto.



Fonte: Produção do autor.

A variável IVT 2004 apresentou uma relação positiva com a variável dependente, indicando que quanto maior o valor da terra em 2004, maior a probabilidade de que neste local ocorra a expansão do cultivo da soja. Como discutido nas seções anteriores, na Região de Santarém, o cultivo da soja ocorre, no geral, em áreas com alto valor. Isto ocorre, pois, um maior valor do IVT indica que o local possui características favoráveis ao desenvolvimento de atividades agrícolas. O investimento do cultivo de soja em áreas mais valorizadas é realizado considerando algumas condições que indicam que a atividade tem potencial para dar um bom retorno financeiro ao agricultor. Parte desse potencial em relação ao retorno financeiro passa pelo desenvolvimento de cultivo em áreas que apresentam boas condições locais, tais como: ausência de embargos do IBAMA, baixa declividade, boas condições de infraestrutura logística, alta proporção de áreas já abertas, dentre outros.

A relação da variável “proporção de vegetação secundária em 2004” também apresentou uma relação positiva com a variável dependente. No geral, as áreas de Vegetação secundária correspondem a áreas abandonadas após o desmatamento ou podem ser áreas derivadas de antigas pastagens abandonadas, como também de locais onde são desenvolvidas atividades agroextrativistas ou áreas sem uso agrícola, utilizadas no processo de especulação fundiária. Na Região de Santarém, principalmente no Planalto Santareno, alguns pequenos produtores, que desenvolviam atividades agrícolas de pequena escala, tiveram suas terras compradas por grandes produtores que buscam iniciar

ou expandir o cultivo de soja previamente existente nessa localidade (SANTOS, 2020). Como as áreas de Vegetação Secundária não são consideradas na moratória da soja, elas são vistas pelos grandes agricultores como uma reserva de terras e normalmente elas são convertidas para pasto e posteriormente para soja (CARVALHO et al., 2019).

A variável Diferença da proporção de “Áreas de Floresta entre 2004 e 2020” possui uma relação positiva com variável dependente. Como a variável abrange a supressão da cobertura florestal entre 2004 e 2020, parte da supressão pode ter ocorrido antes de 2008, não sendo embargada pelo acordo da moratória da soja. Como discutido anteriormente o processo de desmatamento se insere no ciclo de conversão definido por Costa (2012) como "Florestas Originárias" para “Terras para Pastagem” ou diretamente para “Terras para Lavoura”. Desta forma, os agricultores conseguem ampliar a área para o plantio da soja em áreas desmatadas, embora não promovam o desmatamento de forma direta. Apesar desta variável não distinguir as áreas desmatadas ocorridas antes e após o acordo da moratória da soja, ao mostrar relação positiva entre a supressão florestal e a expansão das áreas deste cultivo, ela mostra a importância do desmatamento na transformação da “terra com floresta” para a terra como mercadoria, que poderá ser, em um dado momento, incorporada ao sistema de produção da soja.

Além disso, sabe-se que uma parcela das áreas de cultivo de soja existentes em 2020 está em locais em desacordo com a moratória, como já discutido nas seções anteriores.

Como esperado, a variável Tempo de Viagem até o porto em 2004 no período chuvoso apresentou uma relação negativa com a variável dependente. O período chuvoso tem um importante papel na análise das condições de acessibilidade ao porto, pois a colheita na região ocorre nos meses de março e abril e as estradas não pavimentadas tornam-se um risco para o transporte da produção (ESCADA et al., 2009). Como discutido anteriormente, idealmente, as áreas de cultivo de soja devem se localizar em locais onde as condições de acessibilidade são boas durante todo o ano. No período seco, o deslocamento nas vias vicinais é pouco impactado, contudo o cenário muda no período chuvoso, que é o período da colheita sendo importante que a área de cultivo se localize próxima a rodovias pavimentadas, que não tem as suas condições de circulação afetadas no período de chuva. E, de fato, na região de Santarém, as áreas de cultivo de soja se

encontram próximas das 3 principais rodovias pavimentadas da região como apresentado na Figura 411, que garantem boas condições de acesso durante todo ano.

A variável “Distância até as áreas de cultivo de soja já existentes em 2004”, apresentou uma relação negativa com a variável dependente, como esperado. Analisando a localização das áreas de expansão do cultivo da soja, nota-se que elas se localizam próximas às áreas existentes em 2004. Em geral, são áreas com boas condições para o plantio, de forma que as novas áreas de cultivo tendem a correr nas proximidades desses locais. Outra possibilidade é de que as novas áreas de cultivo pertençam a produtores que já cultivavam soja em 2004, configurando-se como uma extensão da área de plantio já existente.

4.6 Índice de suscetibilidade à expansão da soja

Após a definição das variáveis a serem utilizadas na composição do índice, foi realizada a composição da matriz de comparação pareada. Semelhante ao realizado na construção do IVT foram atribuídos valores entre 1 a 9, onde o menor valor evidencia importância igual na comparação das duas variáveis e, o maior valor indica que uma variável é extremamente mais importante que a outra no atendimento ao objetivo de análise proposto. A construção da matriz se baseou no referencial bibliográfico apresentado na Seção 2.3 e buscou responder a seguinte pergunta: Onde estão as áreas com maior e menor suscetibilidade à conversão da soja? A Figura 4.38 apresenta a matriz de comparação pareada resultante.

Figura 4.38– Matriz de comparação pareada¹¹.

	Plt	TVp	TI	UC	Flr	Desmat	TMcar	Assent	Past	VS	TVu
Plt	1	2	3	4	5	5	6	8	7	8	9
	TVp	1	2	3	4	4	5	7	6	7	8
	TI		1	2	3	3	4	7	6	7	7
			UC	1	2	2	3	5	4	5	6
				Flr	1	1	2	4	3	4	5
					Desmat	1	2	4	3	4	5
						TMcar	1	2	3	2	4
							Assent	1	2	3	3
								Past	1	2	3
									VS	1	2
										TVu	1

Fonte: Produção do autor.

A avaliação da consistência da Matriz de comparação foi realizada a partir do cálculo da Razão de Consistência (RC). De acordo com Saaty (2008), uma Razão de Consistência é satisfatória quando for igual ou menos que 0,1, o valor encontrado para a matriz de comparação pareada apresentada na Figura 3.7 foi de 0,96.

Com uma matriz de comparação pareada consistente, foram definidos os pesos para cada variável na composição do índice proposto. Os pesos definidos a partir do cálculo dos autovetores normalizados e a média do auto vetores. Os pesos resultantes são apresentados na Tabela 4.4.

¹¹ **Plt** : Proporção de área de Platô; **TVp**: Tempo de viagem até o porto no período chuvoso; **TI**: Proporção de terras indígenas; **UC**: Índice de unidades de conservação; **Flr**: Proporção de áreas de Floresta; **Desmat**: Proporção de área desmatadas após o ano de 2008; **TMcar**: Tamanho médio do imóvel (CAR); **Assent**: Proporção de assentamentos; **Past**: Proporção de áreas de pastagem; **VS**: Proporção de áreas de Vegetação Secundária; **TVu**: Índice do tempo de viagem até a área urbana mais próxima no período chuvoso.

Tabela 4.4 – Pesos derivados da AHP.

Fator	Pesos Derivados %	% acumulada
Plt	0,276	27%
TVp	0,201	47%
TI	0,15	62%
UC	0,1	72%
Flr	0,068	79%
Desmat	0,068	86%
TMcar	0,044	90%
Assent	0,03	93%
Past	0,027	96%
VS	0,02	98%
TVu	0,015	100%

Fonte: Produção do autor.

Com base nos pesos atribuídos às variáveis para a composição do índice, apresentados na Tabela 4.4, nota-se que as características físicas do terreno, representadas pela variável de proporção de áreas de platô, e as condições de acessibilidade aos portos, caracterizadas pela variável de tempo de viagem ao porto no período chuvoso, são os fatores que mais influenciaram o índice. A soma dos pesos atribuídos a essas duas variáveis corresponde a 47% do índice. De acordo com a revisão de literatura feita na Seção 2.3, esses dois fatores exercem importante papel no processo de expansão do cultivo de soja na Amazônia, uma vez que as áreas de cultivo demandam mecanização e rapidez no escoamento dos produtos, de forma que a acessibilidade e estradas e portos pode ser um grande impeditivo à produção. Fatores relacionados com políticas públicas de conservação ambiental ou acordos comerciais, como a moratória da soja, representam restrições sobre os locais onde o cultivo da soja pode ocorrer, porém não são representados como impedimento. Conforme demonstrado no relatório de 2021 da moratória divulgado pela

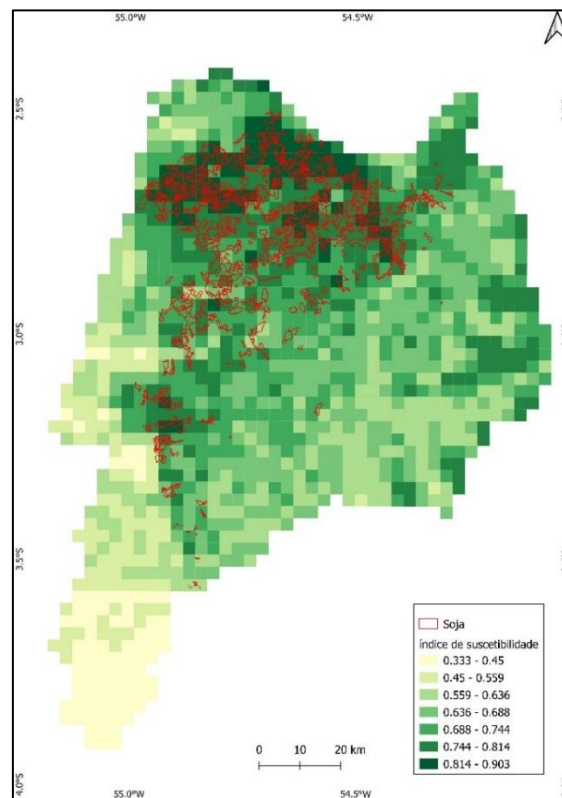
Abiove (2021), que indica que houve aumento de soja cultivada em áreas desmatadas após 2008. Além disso, alguns trabalhos mencionam evidências sobre o aumento de atividades antrópicas em unidades de conversação e terras indígenas (MESSIAS, 2021; RORATO, 2020). O efeito das políticas públicas está atrelado a capacidade de atuação do governo federal, e se observa que ao longo dos últimos anos, a eficácia das políticas de comando e controle na Amazônia vem oscilando. Portanto, o efeito das áreas de unidades de conservação, terras indígenas, áreas desmatadas após 2008 e áreas de floresta em relação à expansão da soja varia de acordo com as ações do governo federal, enquanto que a importância das condições físicas do terreno e da acessibilidade aos portos sempre é alta, independente do cenário.

Nas Figura 4.39 e 4.40, são apresentados, respectivamente, o resultado do índice de suscetibilidade à expansão da soja e o histograma de distribuição do índice na região de Santarém. Na Figura 4.39 é possível observar um agrupamento na área do planalto santarenense de altos valores no índice de suscetibilidade. A região apresenta boas condições para o cultivo da soja na região, e é o local onde mais se tem cultivado esse produto. Ao longo da BR-163 também existem locais com altos valores no índice. Nesses locais prevalecem áreas de pastagens recém-abertas com topografia plana e com boas condições de acessibilidade ao porto. Também é possível observar valores intermediários do índice em alguns locais da porção leste, que estão localizados próximos à PA 370, que possuem topografia favorável à mecanização. Já os menores valores se localizam ao longo da Flona Tapajós, por se tratar de uma unidade de conservação e não apresentar condições muito favoráveis ao cultivo da soja.

Na Figura 4.40 é possível observar que a maior parte das células que compõem a grade da região de Santarém está nos intervalos de valor intermediário do índice. Isso ocorre porque a região possui uma dinâmica de ocupação mais antiga e, com isso, apresenta uma grande proporção de *Terras para Pastagem e Lavoura* e uma malha viária bem consolidada, além de apresentar uma topografia bastante favorável à mecanização em boa parte do território. Se considerarmos os dois intervalos com maior valor para classificar uma área como “muito suscetível a expansão da soja”, 25% (319 células ou 2.871 km²) delas podem ser classificadas como “muito suscetível a expansão da soja”. Cerca de 75% (476 km²) das áreas de expansão do cultivo da soja entre 2004 e 2020 estão em células com “alta suscetibilidade a expansão da soja”.

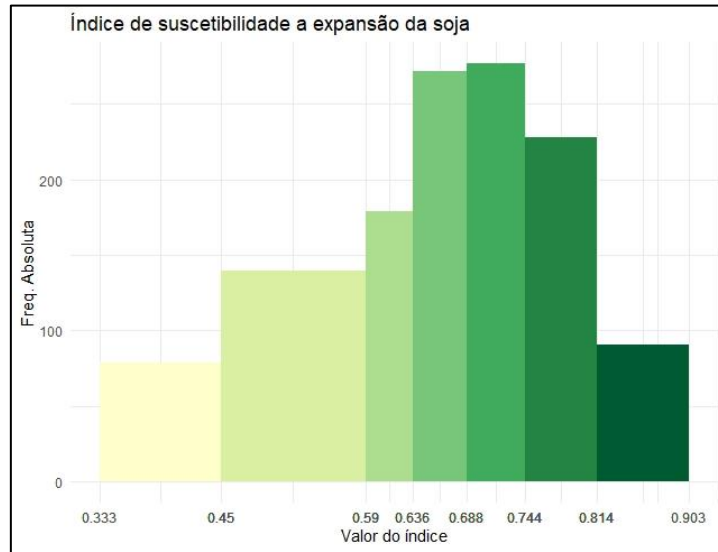
Observa-se também que, exceto na região sudoeste da área de estudo, onde se localiza a FLONA Tapajós, grande parte da região apresenta valores altos do índice de suscetibilidade, acima de 0,63. O que indica que há possibilidades de que grande parte da área possa se converter para soja, dado que as condições que se estabeleceram como essenciais para o cultivo desse grão, são atendidas. São áreas que apresentam relevo favorável, apresentam algumas áreas já convertidas para pastagem e fácil acesso aos portos. No caso da BR-230 (Transamazônica), na parte sul da região, embora o índice seja um pouco menor, grande parte dos trechos já se encontra pavimentada. Nessa área, predominam pastagens e áreas agrícolas, em grande parte, associadas aos sistemas agrários camponeses (CODEÇO, 2021). Outro local que traz grandes preocupações nessa região, diz respeito à área central próxima da represa Curuá-Una, são áreas de ocupação tradicional, ribeirinhas ou projetos de assentamento de caráter sustentável, com áreas florestais e vegetação secundária associada ao sistema de roçado (PACHECO, 2023). A pressão exercida pela agricultura industrial pode levar a expansão desses cultivos sobre esses territórios.

Figura 4.39 – Resultado do índice de Suscetibilidade a expansão da soja na região de Santarém.



Fonte: Produção do autor.

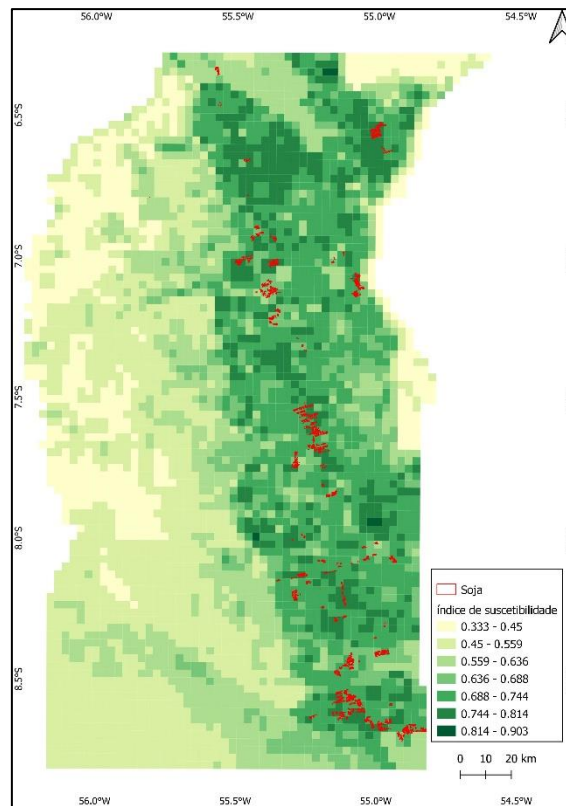
Figura 4.40 – Distribuição do índice de Suscetibilidade a expansão da soja na região de Santarém.



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 4.41 é apresentado o resultado do índice de suscetibilidade à expansão da soja e o histograma de distribuição do índice na região de Novo Progresso. Assim como observado na região de Santarém, os maiores valores do índice se localizam ao longo da BR – 163. Por possuir uma ocupação mais recente, a região de Novo Progresso possui um percentual menor que o de Santarém de sua área total coberta por áreas de pastagens, elas se concentram principalmente ao longo do traçado da rodovia. Ainda assim, é possível observar alguns valores intermediários dentro dos limites da Flona Jamanxim, resultado das ocupações irregulares dentro da unidade de conservação, que provocou a abertura de áreas de pastagem e também de estradas vicinais. Os menores valores também se encontram concentrados dentro da Flona, mas em áreas onde não há ocupação humana, demonstrando a importância e eficácia, ainda que parcial, de políticas públicas para a contenção do avanço desses sistemas agrários com suas lógicas mecânico-química sobre o bioma florestal.

Figura 4.41 – Resultado do índice de suscetibilidade à expansão da soja na região de Novo Progresso.



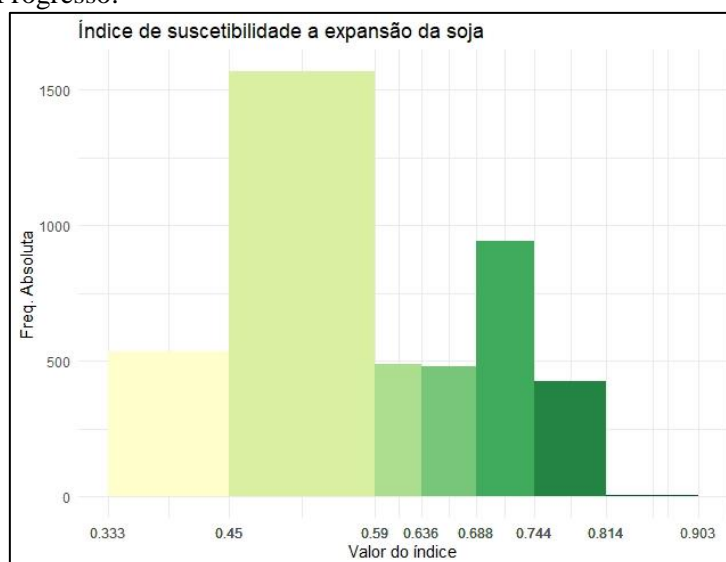
Fonte: Produção do autor.

Na Figura 4.42 é apresentada a distribuição dos valores do índice na região de Novo Progresso. Ao contrário do que foi verificado na região de Santarém, a distribuição dos valores do índice em Novo progresso se concentra nos intervalos de menor valor, isso ocorre devido a rede viária vicinal pouco desenvolvida na região e a menor proporção de áreas abertas com pastagem na região, ambos fatores ligados à ocupação recente. As áreas com proporção de áreas “muito suscetíveis a expansão da soja”, correspondem à 9% da área total (429 células ou 3.861 km²). Embora seja uma proporção menor do que a de Santarém (319 células), em termos de área, corresponde a uma área maior. Destaca-se ainda que no cruzamento do índice com as áreas de cultivo de soja em 2020, obteve-se que 77% (104 km²) dessas áreas está em áreas “muito suscetíveis à expansão da soja”.

Conforme a ocupação dessa região vai se consolidando, ela tende a apresentar uma maior capilaridade, por meio da abertura de novas estradas vicinais. Em adição a esse cenário, há um projeto do Governo Federal ainda não implementado, relacionado com a logística

de transporte de grãos, o Ferrogrão (EF-170). Esse projeto de ferrovia de extensão de 933 km, foi planejado para interligar os municípios de Sinop/MT e Itaituba/PA (ETCs de Miritituba/Santarenzinho/Itapacurá), rota pela qual a produção do centro-norte de Mato Grosso deverá ser escoada via hidrovia do baixo Tapajós aos portos de Santarém/PA e Barcarena/PA¹². O traçado dessa ferrovia deverá passar próximo a diversas Terras Indígenas (TIs), nesta região que apresenta uma grande importância em termos da conservação da floresta e de sua biodiversidade e, historicamente caracterizada por conflitos socioambientais e fundiários (CASTRO, 2004).

Figura 4.42 – Distribuição do índice de Suscetibilidade à expansão da soja na região de Novo Progresso.



Fonte: Produção do autor.

¹² <https://xingumais.org.br/obra/ferrograo-ef-170-trecho-sinop-mt-miritituba-pa>

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo analisar a expansão do cultivo da soja entre 2004 e 2020 em duas regiões no estado do Pará, em que o processo de expansão do modelo de produção agrícola de larga escala ocorreu em momentos diferentes. Ambas as regiões se encontram inseridas no corredor logístico de transporte, que tem como objetivo facilitar e viabilizar o escoamento da produção oriunda da região Centro-Oeste nos portos que compõem o Arco Norte. Foi observado que na Região de Santarém o processo de expansão do cultivo da soja encontra-se consolidado, tendo iniciado no início dos anos 2000, com a abertura do porto terminal de cargas da Cargill. Enquanto que na região de Novo Progresso, o processo de inserção do cultivo de soja ainda está no início, com marco inicial relativo à abertura do porto de Miritituba em 2014 e a conclusão da pavimentação da BR-163 em 2019.

As variáveis criadas para analisar a relação da valorização da terra e as condições de acessibilidade aos portos, a partir de estimativas de tempo de viagem no período seco e chuvoso, com o processo de expansão da soja em ambas as regiões, se mostraram importantes e auxiliaram na análise exploratória. A produção das variáveis de tempo de viagem para o período seco e chuvoso permitiu analisar com maior acurácia as condições de acessibilidade aos portos, evidenciando uma grande diferença no tempo de viagem gasto entre os períodos seco e chuvoso, reforçando o papel das rodovias pavimentadas como importantes vetores para o escoamento da produção, e como fator importante para a expansão dessa cultura agrícola. Com as variáveis sobre a valorização da terra foi possível identificar as áreas com maior valorização entre os anos de 2004 e 2020. Essas duas variáveis, TV e IVT, foram incorporadas no modelo de regressão logístico para analisar a expansão da soja. As variáveis de Tempo de Viagem até os portos e áreas urbanas foram utilizadas no modelo para o período chuvoso. O período chuvoso se mostrou mais importante por ser justamente o período da safra e por dificultar o acesso por estradas, em locais onde elas não são pavimentadas. Além dessas variáveis, destacou-se também o desmatamento do período de 2004 a 2020, como um elemento importante na geração de estoque de terras para essa atividade. Grande parte desse desmatamento, 78%, correu no período de 2004 a 2007, anterior a moratória da soja, entretanto, após 2008, é ainda possível observar uma proporção de 22% de áreas de expansão da soja.

O modelo de regressão logístico apresentou um bom poder preditivo e a relação da maioria das variáveis independentes com a variável dependente foi semelhante ao observado em outros trabalhos que analisam a expansão da soja na Amazônia. Porém, o que diferencia essa análise das demais, é o uso de variáveis que além de considerar a logística de transporte no período chuvoso, avalia indiretamente o mercado de terras, representado pelas variáveis de valorização da terra e desmatamento, fatores fundamentais no processo de expansão da soja. Apesar das relações indiretas e não imediatas com o desmatamento, esse processo se mostra importante na análise da expansão dessa *commodity*, principalmente em áreas de fronteiras de ocupação com grandes áreas florestais, que produzem terras para serem incorporadas ao mercado e posteriormente ao sistema de produção da soja. Desta forma, a relação significativa encontrada entre desmatamento e a expansão da soja, deve ser considerada nas políticas de controle do desmatamento e no rastreamento desse produto, com um intervalo de tempo maior do que 2 - 3 anos.

Com esses resultados a hipótese levantada de que a logística de transporte, representada pelo indicador de Tempo de Viagem (TV), e o mercado de terras, representado pelo Índice de Valorização da Terra (IVT) e pelo desmatamento, são fatores importantes associados à expansão da soja, é aceita. Para os próximos trabalhos, sugere-se o uso do modelo de regressão beta, que permite que a variável dependente assumira valores em um intervalo entre 0 e 1. Na análise realizada no presente trabalho, foi necessário transformar a variável dependente em variável binária para o uso na regressão logística.

O índice de suscetibilidade à expansão da soja se mostrou robusto, uma vez que se observou que 77% das áreas de cultivo de soja presente em Novo Progresso em 2020 encontram-se em locais com alta suscetibilidade a expansão da soja. Ainda que o modelo de regressão não tenha sido gerado para essa região, as variáveis do modelo gerado para Santarém que incluem o IVT, índice não utilizado diretamente na estimativa do índice de suscetibilidade em sua forma sintética, mas por meio das variáveis que o compõe, foram adequadas para a geração do índice para Novo Progresso. Em Santarém, como esperado, o índice mostra que 75% da área de expansão da soja em 2020 se encontra em locais com alta suscetibilidade. Em ambas as regiões, encontramos uma proporção grande de áreas com alta suscetibilidade. Em Santarém com 2.871 km² e Novo Progresso com 3.861 km². Em 2020 essas regiões apresentavam áreas de soja de 794 km² e 334 km²,

respectivamente, o que indica um grande potencial para a expansão desse cultivo. No município de Novo Progresso, que apresenta uma maior área de floresta íntegra, a extensão de áreas suscetíveis pode aumentar ainda mais com o aumento das áreas desmatadas, com o risco da substituição da biodiversidade florestal e de seus usos não madeireiros, para uma matriz agrícola, homogênea, que se baseia no modelo mecânico-químico-genético, com importantes impactos para a floresta, água e para a população local. Na Amazônia, os sistemas agrários relacionados com o cultivo da soja, concorrem muitas vezes com sistemas agrários camponeses estando frequentemente em situações de disputa pela terra. Por essa razão, a identificação de áreas suscetíveis à expansão de soja é um passo importante no planejamento e ordenamento territorial dessa região, possibilitando criar políticas que controlem e assegurem o acesso à terra às populações locais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEL, M. Transnational grain trade threatens Brazil's Amazon. **NACLA Report on the Americas**, v. 53, n. 1, p. 26-31, 2021.

ABIOVE. **7º ano do mapeamento e monitoramento do plantio de soja no bioma amazônia**. 2014. Disponível em: <https://abiove.org.br/relatorios/moratoria-da-soja-relatorio-do-7o-ano/>.

ABIOVE. **Moratória da soja (safra 2019/ 2020)**. 2021. Disponível em: <https://abiove.org.br/relatorios/moratoria-da-soja-relatorio-13o-ano/>.

AGAPITO, L. S.; MIRANDA, M. A.; JANUÁRIO, T. F. J. A political agenda in conflict with environmental protection: a critical policy essay from Brazil. **International Criminology**, v. 2, p. 206-218, 2022.

ALBUQUERQUE, P. H. M.; MEDINA, F. A. S.; SILVA, A. R. Regressão logística geograficamente ponderada aplicada a modelos de credit scoring. **Revista Contabilidade & Finanças**, v. 28, p. 93-112, 2017.

ALLEGRETTI, M. A construção social de políticas públicas: Chico Mendes e o movimento dos seringueiros. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, n. 18, p. 39-59, 2008

ALVES, P. A.; AMARAL, S.; ESCADA, M. I. S.; MONTEIRO, A. M. V. Explorando as relações entre a dinâmica demográfica, estrutura econômica e mudanças no uso e cobertura da terra no sul do Pará: lições para o distrito florestal sustentável da BR 163. **Geografia (Rio Claro)**, v. 35, n. 1, p. 165-182, 2010.

AMARAL, D.F.; FERREIRA FILHO, J. B. S.; CHAGAS, A. L. S.; ADAMI, M. Expansion of soybean farming into deforested areas in the Amazon biome: the role and impact of the soy moratorium. **Sustainability Science**, v. 16, n. 4, p. 1295-1312, 2021.

ASSUNÇÃO, J.; GANDOUR, C.; ROCHA, R. Deforestation slowdown in the Brazilian Amazon: prices or policies? **Environment and Development Economics**, v. 20, n. 6, p. 697-722, 2015.

BALETTI, B. Ordenamento territorial: neo-developmentalism and the struggle for territory in the lower Brazilian Amazon. In: FAIRHEAD, J.; LEACH, M.; SCOONES, I. (Ed.). **Green grabbing: a new appropriation of nature**. [S.l.]: Routledge, 2014. p. 347-372.

BARONA, E.; RAMANKUTTY, N.; HYMAN, G.; COOMES, O.T. The role of pasture and soybean in deforestation of the Brazilian Amazon. **Environmental Research Letters**, v. 5, n. 2, 2010.

BARROS, M. J. B. De agrovila a nó logístico do agronegócio na Amazônia: o caso de Miritituba, Itaituba, Pará. **Geosul**, v. 34, n. 71, p. 382-406, 2019.

BARRETO, P.; PEREIRA, B. **Os potenciais impactos de fiscalizar frigoríficos sem compromissos contra o desmatamento**. Belém, PA: Imazon, 2018. Disponível em: <https://imazon.org.br/wp-content/uploads/2018/08/os-potenciais-impactos-de-fiscalizar-frigorificos-sem-compromissos-contra-o-desmatamento.pdf>.

BECKER, B. K. Geopolítica da Amazônia. **Estudos Avançados**, v. 19, n. 53, p. 71-86, 2005.

BECKER, B. K. O governo do território em questão: uma perspectiva a partir do Brasil. **Parcerias Estratégicas**, v. 14, n. 28, p. 33-50, 2009.

BECKER, B. K. Revisão das políticas de ocupação da Amazônia: é possível identificar modelos para projetar cenários? **Parcerias Estratégicas**, v. 6, n. 12, p. 135-159, 2001.

BERTZKY, M.; KAPO, V.; SCHARLEMANN, J.P.W. **Indirect land use change from biofuel production: implications for biodiversity**. [S.l.]: JNCC, 2011.

BONATO, E. R.; BONATO, A. L. V. **A soja no Brasil: história e estatística**. Londrina: Embrapa-CNPSo, 1987. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/446431>.

BRANDÃO, A. S. P. et al. **Crescimento agrícola no período 1999-2004, explosão da área plantada com soja e meio ambiente no Brasil**. 2005. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=4666:td-1062-crescimento-agricola-no-periodo-1999-2004-explosao-da-area-plantada-com-soja-e-meio-ambiente-no-brasil&catid=309:2005&directory=1.

CAPANEMA, V. P. **Fatores de degradação florestal atuantes em diferentes estágios da fronteira agropecuária na Amazônia: estudo de caso na região de Sinop, MT**. 2017. 145 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2017.

CARDOSO, A. C.; OLIVEIRA, K.; GOMES, T. V. Mismatches between extended urbanization and everyday socioenvironmental conflicts in Santarém (Brazil). **Sustentabilidade em Debate**, v. 11, p. 83-97, 2020.

CARVALHO, R.; ADAMI, M.; AMARAL, S.; BEZERRA, F. G.; AGUIAR, A. P. D. Changes in secondary vegetation dynamics in a context of decreasing deforestation rates in Pará, Brazilian Amazon. **Applied Geography**, v. 106, 2019.

CASTRO, E. R; MONTEIRO, R; CASTRO, C. P. **Atores e relações sociais em novas fronteiras na Amazônia. Novo Progresso, Castelo de Sonhos e São Félix do Xingu.** [S.l.]: World Bank Group, 2002.

CODEÇO, C. T. et al. Epidemiology, biodiversity, and technological trajectories in the Brazilian Amazon: from malaria to COVID-19. **Frontiers in Public Health**, v. 9, e647754, 2021.

COELHO, A. **Modelagem de dinâmica do uso da terra e cobertura vegetal na região de Santarém, Oeste do Pará.** 2009. 128 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.

COELHO, A. et al. Rural landscapes and agrarian spaces under soybean expansion dynamics: a case study of the Santarém Region, Brazilian Amazonia. **Regional Environmental Change**, v. 21, p. 100, 2021.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Portal de informações agropecuárias.** 2022. Disponível em: <https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/safra-serie-historica-graos.html>.

CORTES, J. C.; D'ANTONNA, A. O. Fronteira agrícola na Amazônia contemporânea: repensando o paradigma a partir da mobilidade da população de Santarém-PA. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi Ciências Humanas**, v. 11, p. 415-430, 2016.

CORTES, J. P. S. et al. Quais as perspectivas da agricultura familiar em um contexto de expansão do agronegócio? zoneamento participativo com representantes comunitários do planalto santareno. **Confins: Revista Franco-Brasileira de Geografia**, n. 45, 2020.

COSTA, S.M.G. **Grãos da floresta: estratégia expansionista do agronegócio na Amazônia.** 2012. 298 p. Tese (Doutorado em Ciências do Desenvolvimento Socioambiental) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2012. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/11157>.

COSTA, W.; DAVIS, J.; OLIVEIRA, A.; FERNANDES, F.; RAJÃO, R.; SOARES FILHO, B. S. **Ferrogrão com terminal em Matupá Partirá ao meio as terras indígenas do Xingu.** 2021. Disponível em: https://csr.ufmg.br/csr/wp-content/uploads/2021/07/Nota-MT-322_final_PT_r.pdf.

COSTA, F. A. Mercado de terras e trajetórias tecnológicas na Amazônia. **Economia e Sociedade**, v. 21, n. 2, p. 245-273, 2012.

CUIABANO, S. M. Principais fatores responsáveis pela expansão da soja no Brasil. **Brazilian Journal of International Relations**, v. 8, n. 3, p. 460-487, 2019.

DALL'AGNOL, A. **A Embrapa soja no contexto do desenvolvimento da soja no Brasil: histórico e contribuições**. Brasília: Embrapa, 2016. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1043614/1/livroembrapa-sojadesenvolvimentobrol.pdf>.

DALL'AGNOL, A. A soja no Brasil: evolução, causas, impactos e perspectivas. In: CONGRESO DE LA SOJA DEL MERCOSUR, 5., 2011. **Anales...** Rosário: Asociación de la Cadena de la Soja Argentina, 2011.

DALL'AGNOL, A.; LAZAROTTO, J. J.; HIRAKURI, M. H. **Desenvolvimento, mercado, rentabilidade da soja brasileira**. Embrapa, 2010. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/854125/1/ct74eletronica.pdf>.

DELGADO, G. **Economia do agronegócio (anos 2000) como pacto do poder com os donos da terra**. [S.l.]: ABRA, 2013.

DIMOBE, K.; GESSNER, U.; OUÉDRAOGO, K.; THIOMBIANO, A. Trends and drivers of land use/cover change in W National Park in Burkina Faso. **Environmental Development**, v. 44, 2022.

DRUCK, S.; CARVALHO, M.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. **Análise espacial de dados geográficos**. Brasília: Embrapa, 2004.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Soja em números (safra 2022/2023)**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Tecnologias de produção de soja: região central do Brasil 2014**. 2014. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/975595/tecnologias-de-producao-de-soja---regiao-central-do-brasil-2014>.

ESCADA, M. I. S.; AMARAL, S.; RENNÓ, C. D.; PINHEIRO, T. F. **Levantamento do uso e cobertura da terra e da rede de infraestrutura no Distrito Florestal da BR-163**. São José dos Campos: INPE, 2009. 52 p. Relatório Técnico de Atividade de Campo de 2008.

FAWCETT, T. An Introduction to ROC Analysis. **Pattern Recognition Letters**, v. 27, p. 861-874, 2006.

FEARNSIDE, P.M. Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e controle. **Megadiversidade**, v. 1, n. 4, p. 113-123, 2005.

FERNANDES, A. A. T.; FIGUEIREDO FILHO, D. B.; ROCHA, E. C.; NASCIMENTO, W. S. Leia este artigo se você quiser aprender regressão logística. **Revista de Sociologia e Política**, v. 28, n. 74, 2020.

- FLEXOR, G.; PEREIRA, S. P. Land market and land grabbing in Brazil during the commodity boom of the 2000s. **Contexto Internacional**, v. 39, n. 2, 2017.
- FOLHES, R. T.; FERNANDES, D. A. A dominância do paradigma tecnológico mecânico-químico-genético nas políticas para o desenvolvimento da bioeconomia na Amazônia. **Papers do NAEA**, v. 31, 2022, p. 540.
- FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION (FAO). **Food and agriculture data**. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data>.
- FREY, G. P.; WEST, T. A. P.; HICKLER, T.; RAUSCH, L.; GIBBS, H. K.; BÖRNER, J. Simulated impacts of soy and infrastructure expansion in the Brazilian Amazon: a maximum entropy approach. **Forests**, v. 9, n. 10, 2018.
- GAYOSO, S. M. Sojicultura e mercado de terras na Amazônia. **Revista de Políticas Públicas**, v. 19, n. 1, p. 173-185, 2015.
- GIBBS, H. K.; RAUSCH, L.; MUNGER, J.; SCHELLY, I.; MORTON, D. C.; NOOJIPADY, P.; SOARES FILHO, B.; BARRETO, P.; MICOL, L.; WALKER, N.F. Brazil's soy moratorium. **Science**, v. 347, n. 6220, p. 377-378, 2015.
- GOLLNOW, F.; HISSA, L. B. V.; RUFIN, P.; LAKES, T. Property-level direct and indirect deforestation for soybean production in the Amazon region of Mato Grosso, Brazil. **Land Use Policy**, v. 78, n. 1, p. 377-385, 2018.
- GOMES, T. V.; CARDOSO, A. C. D. Santarém: o ponto de partida para o (ou de retorno) urbano utopia. **Urbe - Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 11, 2019.
- HEILMAYR, R.; RAUSCH, L. L.; MUNGER, J.; GIBBS, H. K. Brazil's Amazon soy moratorium reduced deforestation. **Nature Food**, v. 1, n. 12, p. 801-810, 2020.
- HOMMA, A. K. O. 500 anos de uso do solo na Amazônia: um contexto histórico. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO DE CONSERVAÇÃO DE SOLO E DA ÁGUA, 13., 2000, Ilhéus. **Anais...** 2000.
- HONG, H. et al. Spatial prediction of rotational landslide using geographically weighted regression, logistic regression, and support vector machine models in Xing Guo Area (China). **Geomatics**, v. 8, n. 2, p. 1997-2022, 2017.
- HOSMER JUNIOR, D.; LEMESHOW, S. **Applied logistic regression**. New York: John Wiley & Sons, 2000.
- HOSMER, D. W.; LEMESHOW, S.; STURDIVANT, R. X. **Applied logistic regression**. New York: John Wiley & Sons, 2013.

HU, C. N.; HUU, C. N. V.; TIEN, N. N. M. Modeling land-use changes using logistic regression in western highlands of Vietnam: a case study of Lam Dong Province. **Agriculture and Natural Resources**, v. 56, n. 5, p. 935-944, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Contagem populacional - 2007**. 2007. Disponível em: www.ibge.gov.br.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Fronteira agrícola – Amazônia Legal**. 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/mapas-regionais/15976-fronteira-agricola-amazonia-legal.html?=&t=o-que-e>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades**. 2020. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **PAM – Produção Agrícola Municipal**. 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=o-que-e>.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Monitoramento do desmatamento da Floresta Amazônica brasileira por satélite**. 2021. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/obt/assuntos/programas/amazonia/prodes>.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). PRODES. **Taxa de desmatamento para a Amazônia Legal**. 2022. Disponível em: http://terrabilis.dpi.inpe.br/app/dashboard/deforestation/biomes/legal_amazon/rates.

LE TOURNEAU, F. M. Is Brazil now in control of deforestation in the Amazon?. **Cybergeog: European Journal of Geography**, 2016.

LIU, Y; YUE, W.; FAN, P. Spatial determinants of urban land conversion in large Chinese cities: a case of Hangzhou. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 38, n. 4, p. 706-725, 2011.

MACEDO, M. N; DEFRIES, R. S. MORTON, D. C. SHIMABUKURO, Y. E. Decoupling of deforestation and soy production in the southern Amazon during the late 2000s. **Sustainability Science**, v. 106, n.4, 2012.

MACHADO, L. A fronteira agrícola da Amazônia brasileira. In: BECKER, B. K. (Ed.). **Geografia e meio ambiente no Brasil**. São Paulo: Hucitec, 2002. p.181–217.

MACHADO, L. O. R. Desflorestamento na Amazônia brasileira: ação coletiva, governança e governabilidade em área de fronteira. **Sociedade e Estado**, v. 24, n. 1, p. 115-147, 2009.

MACUL, M. S. **Índice de valorização da terra e desmatamento em uma região de fronteira agropecuária na Amazônia: região de Novo Progresso, Pará.** 2019. 143p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.

MARTINELLI, L. A.; BATISTELLA, M.; SILVA, R. F. B.; MORAN, E. Soy expansion and socioeconomic development in municipalities of Brazil. **Land**, v. 6, n. 3, 2017.

MARTINI, D. Z.; MOREIRA, M. A.; DALLA-NORA, E. Emprego de geotecnologias para identificar áreas para expansão agrícola de soja no Estado de Rondônia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17, 2015 João Pessoa. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2015. p. 1455-1462.

MARTINS, H.; RIBEIRO, J.; SOUZA JUNIOR, C. **Evolução da pressão Jamanxim (2006 a 2017).** Belém: Imazon, 2017. Disponível em: <https://imazon.org.br/publicacoes/reducao-da-flona-do-jamanxim-vitoria-da-especulacao-fundiaria/>.

MARTINS, J. S. O tempo da fronteira – retorno à controvérsia sobre o tempo histórico da frente de expansão e da frente pioneira. **Tempo Social**, v. 8, n. 1, p. 25-70, 1996.

MCNEIL, B. J.; HANLEY, J.A. Statistical approaches to the analysis of Receiver Operating Characteristic (ROC) curves. **Medical Decision Making**, v. 4, n. 2, p. 137-150, 1984.

MESSIAS, C. G.; SILVA, D.; SILVA, M. B.; LIMA, T. C.; ALMEIRA, C. A. Análise das taxas de desmatamento e seus fatores associados na Amazônia Legal brasileira nas últimas três décadas. **Raega: O Espaço Geográfico em Análise**, v. 52, n. 1, p. 18-41, 2021.

MORTON, D. C.; NOOJIPADY, P.; MACEDO, M. M.; GIBBS, H.; VICTORIA, D. C.; BOLFE, E. L. Reevaluating suitability estimates based on dynamics of cropland expansion in the Brazilian Amazon. **Global Environmental Change**, v. 37, 2016.

NEPSTAD, D.; MCGRATH, A.; STICKLER, C.; ALENCAR, A.; AZEVEDO, A.; SWETTE, B.; BEZERRA, T.; DIGIADO, A.; SHIMADA, J.; MOTTA, R. S.; ARMIJO, E.; CASTELLO, L.; BRANDO.; HANSEN, M. C.; HORN, M. M.; CARVALHO, O.; HESS, L. Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains. **Science**, v. 344, n. 6188, p. 1118-1123, 2017.

NEPSTAD, D.; STICKLER, C. M.; ALMEIDA, O. T. Globalization of the amazon soy and beef industries: opportunities for conservation. **Conservation Biology**, v. 20, n.6, 2006.

O'CONNOR, C. D.; CALKIN, D. E.; THOMPSON, M. P. An empirical machine learning method for predicting potential fire control locations for pre-fire planning and operational fire management. **International Journal of Wildland Fire**, v. 26, p. 587-597, 2017.

OGITA, S.; RESENDE, L. F.; ASSIS, T. F. **Estudo dos corredores logísticos do arco norte - diagnóstico preliminar**. [S.l.]: The World Bank, 2019.

OLIVEIRA, A. H. M. **Dinâmicas da população, do uso e cobertura da terra e inibição do desmatamento com a criação da FLONA Jamanxim**. 2019. 134p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019.

OLIVEIRA, C. M.; SANTANA, A. C.; HOMMA, A. K. O. Os custos de produção e a rentabilidade da soja nos municípios de Santarém e Belterra, Estado do Pará. **Acta Amazônica**, v. 43, n. 1, p. 23-31, 2013.

PACHECO, F. D. **Análise espacial para a identificação e caracterização de fatores ambientais e socioeconômicos associados ao cultivo de mandioca no Estado do Pará**. 2023. 124 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2022.

PAULA, D. S.; ESCADA, M. I. S.; ORTIZ, J. O. Análise multitemporal do uso e cobertura da terra na Amazônia: a expansão da agricultura de larga escala na Bacia do Rio Curuá-Una. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 74, n. 2, p. 379–398, 2022

PAULA, D. S. **Expansão da agricultura de larga escala na Bacia do Rio Curuá-Una (PA): implicações ambientais e socioeconômicas**. 2021. 145p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2021.

PEREIRA, L. C.; LOMBARDI, F. **Avaliação da aptidão agrícola das terras: proposta metodológica**. Embrapa Meio Ambiente, 2004. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/14508/1/documentos43.pdf>.

PESSÔA, E. C. S.; NASCIMENTO, H. M. A fronteira de commodities na Amazônia (2000-2019): As Mudanças das Relações Rural-Urbanas na Região Metropolitana de Santarém. **Informe Gepec**, v. 26, n. 1, p. 146–164, 2022.

PINHEIRO, T. F. **Padrões e trajetórias de degradação florestal em fronteiras madeireiras da Amazônia**. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

PORTO, C. Macrocenários da Amazônia 2000 - 2020. **Parcerias Estratégicas**, v. 6, n. 12, 2001.

REIS, M. S. **Detection and analysis of forest regeneration trajectories in the lower Tapajós Region**. 222 p. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2022.

REYDON, B. P.; PLATA, L. E. A. O plano real e o mercado de terras no Brasil: lições para a democratização do acesso à terra. In: REYDON, B. P.; CORNÉLIO, F. M. N. (Org.). **Mercados de terras no Brasil: estrutura e dinâmica**. Brasília: NEAD, 2006, p. 267-284.

RICHARDS, P.; ARIMA, E. Y.; WALKER, R.; CALDAS, M. M. Statistical confirmation of indirect land use change in the Brazil Amazon. **Environmental Research Letters**, v. 6, n. 2, 2011.

RICHARDS, P. D.; WALKER, R. T.; ARIMA, E. Y. Spatially complex land change: the indirect effect of Brazil's agricultural sector on land use in Amazonia. **Global Environmental Change**, v. 29, p. 1-9, 2014.

RODRIGUES, J. C. O Projeto Arco Norte na Amazônia e a sua relação com o agronegócio. **Casa da Geografia de Sobral**, v. 23, n. 1, p. 317 – 351, 2021.

RORATO, A. C. et al. Brazilian Amazon indigenous peoples threatened by mining bill. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 10, p. 1040, 2020.

SILVA JUNIOR, C.A.; LIMA, M. Soy moratorium in Mato Grosso: deforestation undermines the agreement. **Land Use Policy**, v. 71, p. 540-542, 2018.