



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO E MEIO
AMBIENTE

MILENA MONTEIRO FEITOSA

IMPACTOS ECONÔMICOS, SOCIAIS E AMBIENTAIS NA PRODUÇÃO DE SOJA
NO MATOPIBA

FORTALEZA

2025

MILENA MONTEIRO FEITOSA

IMPACTOS ECONÔMICOS, SOCIAIS E AMBIENTAIS NA PRODUÇÃO DE SOJA NO
MATOPIBA

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. José de Jesus Sousa Lemos.

FORTALEZA

2025

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

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

- F336i Feitosa, Milena Monteiro.
Impactos econômicos, sociais e ambientais na produção de soja no MATOPIBA / Milena Monteiro
Feitosa. – 2025.
139 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em
Desenvolvimento e Meio Ambiente, Fortaleza, 2025.
Orientação: Prof. Dr. José de Jesus Sousa Lemos.
1. Produção de soja. 2. Emissão de gases do efeito estufa. 3. Cerrado. 4. MATOPIBA. 5. Uso e cobertura
da terra. I. Título.

CDD 333.7

MILENA MONTEIRO FEITOSA

IMPACTOS ECONÔMICOS, SOCIAIS E AMBIENTAIS NA PRODUÇÃO DE SOJA NO
MATOPIBA

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Aprovada em: 25 / 11 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José de Jesus Sousa Lemos (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dr.^a Patrícia Verônica Pinheiro Sales Lima
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dr.^a Jaira Maria Alcobaca Gomes
Universidade Federal do Piauí (UFPI)

Prof.^a Dr.^a Filomena Nádia Rodrigues Bezerra
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Everton Nogueira Silva
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

Ao meu avô professor Valmir Monteiro
Barbosa.

AGRADECIMENTOS

Gratidão a Deus por me sustentar, me fortalecer, conceder o desenvolvimento da minha inteligência e acalmar o meu coração; e à espiritualidade amiga, por todo abraço que recebi e por estarem sempre comigo.

À minha mãe Norma Suely e às minhas gatinhas (Maria Flor e Maria Liz) por estarem ao meu lado, me apoiando e confortando o meu coração, minha gratidão.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA) da Universidade Federal do Ceará pela oportunidade de crescimento pessoal e profissional, bem como à CAPES pelo apoio financeiro ao desenvolvimento desta pesquisa.

Sou profundamente grata ao professor Dr. José de Jesus Sousa Lemos por me acompanhar nesta trajetória acadêmica. Foram mais de 10 anos envolvendo graduação, mestrado e doutorado, dentre diversas pesquisas. Foi uma grande honra ser sua orientanda. Gratidão por tudo!

Gratidão aos professores da banca examinadora, meu carinho e respeito, Dr^a Patrícia Verônica Pinheiro Sales Lima, Dr^a Filomena Nádia Rodrigues Bezerra, Dr^a Jaira Maria Alcobaca Gomes e ao professor Dr. Everton Nogueira Silva, pelas valiosas contribuições que enriqueceram este estudo.

À Louize Nascimento, minha parceira de doutorado e amiga para a vida. Gratidão por tornar os dias difíceis suportáveis e os dias bons, inesquecíveis. Enfrentamos esta jornada juntas, celebramos cada conquista e nos apoiamos em cada desafio.

É o caminho que me guia para eternidade É o
braço forte que me livra da maldade É a vida, a
justiça e a verdade - Jonatas Fonseca, "Ele é".

RESUMO

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de soja, um dos grãos mais cultivados e consumidos no mundo. No entanto, todo esse progresso econômico ocorre em uma região que abrange 91% da área do bioma Cerrado, o segundo maior da América Latina, conhecido por sua rica biodiversidade e sua importância fundamental para a preservação do clima e dos recursos naturais indispensáveis à sobrevivência humana. O presente trabalho tem como objetivo avaliar os impactos da produção de soja sobre a emissão de gases do efeito estufa e na geração de externalidades na região do MATOPIBA. De forma específica, o estudo buscou: a) Analisar a dinâmica temporal do avanço do cultivo de soja sobre áreas de vegetação nativa e áreas anteriormente cultivadas com lavouras alimentares tradicionais na região do MATOPIBA; b) Investigar os fatores que influenciam as emissões e reduções de GEE na produção agrícola na região do MATOPIBA entre 2006 e 2017; c) Analisar as vulnerabilidades socioeconômicas dos municípios da região MATOPIBA, identificando e quantificando as principais carências relacionadas ao desenvolvimento social e econômico local; d) Analisar as transformações espaço-temporais no uso e cobertura da terra, bem como as transições associadas na região do MATOPIBA entre os anos de 1985 e 2023. Foram utilizados dados de natureza secundária e retirados do Censo Demográfico, Censo Agropecuário, Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil (MapBiomas), Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) e Produção Agrícola Municipal (PAM). Para o alcance do primeiro objetivo foi empregado o modelo *shift-share*. Para o segundo objetivo foi utilizado uma metodologia híbrida, com a primeira etapa o uso de modelos lineares (decomposição em componentes principais) e, em seguida, modelos não lineares (redes neurais artificiais). Para obter o terceiro objetivo da pesquisa foi usado o método de Análise Fatorial, com a técnica de decomposição em componentes principais. Para o quarto objetivo, foi representado cartograficamente as análises espaço-temporais, a distribuição espacial das classes de cobertura e uso da terra, assim como as transições, sendo utilizadas de técnicas sensoriamento remoto. Os resultados obtidos no capítulo 1 mostraram que, entre os anos de 1985 e 2022, a cultura da soja expandiu-se, incrementando a produtividade e as áreas mediante a substituição da vegetação nativa e das áreas de alimentos. Os resultados alcançados no capítulo 2 apontaram que dos 337 municípios que compõem a MATOPIBA, apenas 100 não tiveram aumento nas emissões de GEE entre 2006 e 2017. No capítulo 3, os resultados atingidos foram que o IVI_MATOPIBA foi de 45,37%, com distribuição heterogênea entre os estados:

Maranhão apresentou o índice mais elevado (52,31%), seguido por Piauí (46,36%), Bahia (46,63%) e Tocantins (38,12%). Os resultados adquiridos no capítulo 4 mostraram que, nos últimos 37 anos, foram convertidos de vegetação natural para agropecuária 18,03 milhões de hectares, o crescimento da cultura da soja para 4,70 milhões de hectares. A pesquisa apresentou mudanças multidimensionais na região do MATOPIBA, transformações no âmbito social, econômico e ambiental da última fronteira agrícola brasileira. A análise dos impactos da expansão da soja revelou inter-relações entre crescimento econômico, degradação ambiental e vulnerabilidades socioeconômicas na região. Conclui-se que compreender tais dinâmicas é fundamental para subsidiar políticas públicas que promovam um modelo de desenvolvimento agrícola mais sustentável no Cerrado brasileiro.

Palavras-chave: produção de soja; emissão de gases do efeito estufa; cerrado; MATOPIBA; uso e cobertura da terra.

ABSTRACT

Brazil is the world's second-largest producer of soybeans, one of the most widely cultivated and consumed grains. However, all this economic progress is taking place in a region that encompasses 91% of the Cerrado biome, the second-largest in Latin America, known for its rich biodiversity and its fundamental importance for preserving the climate and natural resources essential to human survival. This study aims to assess the impacts of soybean production on greenhouse gas emissions and the generation of externalities in the MATOPIBA region. Specifically, the study sought to: a) Analyze the temporal dynamics of the expansion of soybean cultivation into areas of native vegetation and areas previously cultivated with traditional food crops in the MATOPIBA region; b) Investigate the factors influencing GHG emissions and reductions in agricultural production in the MATOPIBA region between 2006 and 2017; c) Analyze the socioeconomic vulnerabilities of municipalities in the MATOPIBA region, identifying and quantifying the main deficiencies related to local social and economic development; d) Analyze the spatiotemporal transformations in land use and land cover, as well as the associated transitions in the MATOPIBA region between 1985 and 2023. Secondary data were used, taken from the Demographic Census, the Agricultural Census, the Annual Mapping Project of Land Use and Land Cover in Brazil (MapBiomas), the Greenhouse Gas Emissions and Removals Estimation System (SEEG), the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), and the Municipal Agricultural Production (PAM). The shift-share model was used to achieve the first objective. A hybrid methodology was used for the second objective, with the first stage using linear models (principal component decomposition) and, subsequently, nonlinear models (artificial neural networks). The third research objective was achieved using Factor Analysis, with the principal component decomposition technique. The fourth objective was to cartographically represent the spatiotemporal analyses, the spatial distribution of land cover and land use classes, and the transitions, using remote sensing techniques. The results obtained in Chapter 1 showed that, between 1985 and 2022, soybean cultivation expanded, increasing productivity and area by replacing native vegetation and food plots. The results obtained in Chapter 2 indicated that of the 337 municipalities that make up MATOPIBA, only 100 did not experience an increase in GHG emissions between 2006 and 2017. In Chapter 3, the results achieved indicated that the IVI_MATOPIBA was 45.37%, with a heterogeneous distribution among the states: Maranhão had the highest index (52.31%), followed by Piauí (46.36%), Bahia (46.63%), and Tocantins (38.12%). The results acquired in Chapter 4 show that, in the last 37 years, 18.03 million hectares were converted from natural

vegetation to agricultural land, with soybean cultivation growing to 4.70 million hectares. The research revealed multidimensional changes in the MATOPIBA region, transforming the social, economic, and environmental aspects of Brazil's last agricultural frontier. Analysis of the impacts of soybean expansion revealed interrelationships between economic growth, environmental degradation, and socioeconomic vulnerabilities in the region. The conclusion is that understanding these dynamics is crucial to informing public policies that promote a more sustainable agricultural development model in the Brazilian Cerrado.

Keywords: soybean production; greenhouse gas emissions; cerrado; MATOPIBA; land use and land cover.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- A região do MATOPIBA e seus biomas.....	25
Figura 2	- Mapa de localização geográfica da região do MATOPIBA.....	36
Figura 3	- Mapa de localização da região do MATOPIBA.....	49
Figura 4	- Rede neural artificial <i>feedforward</i> com uma camada oculta.....	59
Figura 5	- Relação de GEE 2017/2006 para a região de MATOPIBA.....	61
Figura 6	- Importância relativa da pontuação de cada fator nos municípios da MATOPIBA com emissões de GEE \leq e emissões de GEE > 1	65
Figura 7	- Organograma da construção do IVI_MATOPIBA.....	76
Figura 8	- Distribuição Espacial do Índice de Vulnerabilidade Induzida (IVI_MATOPIBA) na região do MATOPIBA por Quintis no ano de 2022.	85
Figura 9	- Análise do Uso e Cobertura da terra entre 1985 e 2023 da região do MATOPIBA.....	101
Figura 10	- Análise da Transição entre 1985-2023 da região do MATOPIBA.....	103

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	- Quantidade de produção mundial de soja, área colhida e produtividade: 1961 a 2023.....	19
Gráfico 2	- Produção de soja e os principais países produtores do grão (milhões de toneladas).....	20
Gráfico 3	- Trajetórias das áreas colhidas de soja e das culturas alimentares no MATOPIBA entre os anos de 1985 e 2022.....	42
Gráfico 4	- Identificação das classes em 1985 que foram convertidas para o cultivo de soja em 2023.....	104

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	- Produção e área de soja dos maiores produtores mundiais, nos anos de 1990 e 2023.....	21
Quadro 2	- Distribuição territorial da região do MATOPIBA por estado.....	24
Quadro 3	- Áreas e territórios atribuídos à região do MATOPIBA.....	26
Quadro 4	- Definições das variáveis utilizadas na pesquisa.....	37
Quadro 5	- Intervalos da estatística KMO para a adequação análise fatorial.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Taxas Geométricas de Crescimento (TGC), R ² ajustado e significância para as variáveis do modelo <i>shift-share</i> na região do MATOPIBA (1985–2022).....	40
Tabela 2	- Variáveis que, por hipótese, afetam positivamente (+) ou negativamente (-) as emissões de gases de efeito estufa (GEE) entre 2006 e 2017 na região de MATOPIBA nesta pesquisa.....	52
Tabela 3	- Frequências absolutas e relativas das emissões de GEE nos municípios da MATOPIBA de 2006 a 2017.....	60
Tabela 4	- Resultados encontrados mostrando a decomposição das 11 variáveis originais em 3 componentes principais.....	62
Tabela 5	- Resultados da estimativa utilizando RNA, com o índice de emissões de GEE como variável dependente e os índices FS1, FS2 e FS3 como variáveis independentes.....	64
Tabela 6	- Classificação e Interpretação dos Quintis do IVI_MATOPIBA.....	80
Tabela 7	- Pesos Fatoriais para Construção dos Índices de Vulnerabilidade (VULAMBI e IVI) na Região do MATOPIBA.....	8
Tabela 8	- Comparativo das Médias Estaduais de Vulnerabilidade Ambiental (VULAGUA, VULSANE, VULLIXO, VULAMBI) no MATOPIBA.....	82
Tabela 9	- Comparativo Estadual das Médias dos Indicadores de Vulnerabilidade e do IVI_MATOPIBA.....	83
Tabela 10	- Composição Estadual dos Quintis do Índice de Vulnerabilidade Induzida (IVI_MATOPIBA).....	84
Tabela 11	- Sistema de classificação do Uso e Cobertura da Terra do MapBiomas.....	93
Tabela 12	- Sistema de classificação adaptada para o MATOPIBA (1985-2023).....	95
Tabela 13	- Evolução temporal do Uso e Cobertura da terra (LULC) na região do MATOPIBA entre 1985 e 2023.....	97
Tabela 14	- Mudanças de Uso e Cobertura da Terra no MATOPIBA (1985-2023).....	102

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	16
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	19
2.1	A soja no Brasil e no mundo.....	19
2.2	MATOPIBA: a ocupação de uma nova fronteira agrícola.....	23
2.3	Dinâmica da soja e impactos ambientais na região do MATOPIBA.....	27
3	DINÂMICA TEMPORAL DA EXPANSÃO DA SOJA NO MATOPIBA (BRASIL): IMPACTOS SOBRE VEGETAÇÃO NATIVA E LAVOURAS ALIMENTARES TRADICIONAIS.....	31
3.1	Introdução.....	33
3.2	Materiais e métodos.....	36
3.2.1	<i>Área de estudo.....</i>	<i>36</i>
3.2.2	<i>Metodologia utilizada para atingir os objetivos.....</i>	<i>37</i>
3.3	Resultados e discussão.....	40
3.4	Conclusões.....	44
4	MODELO HÍBRIDO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS E DECOMPOSIÇÃO DE COMPONENTES PRINCIPAIS PARA PREVER AS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA REGIÃO BRASILEIRA DO MATOPIBA.....	46
4.1	Introdução.....	48
4.2	Materiais e métodos.....	52
4.2.1	<i>Base de dados e construção dos indicadores.....</i>	<i>52</i>
4.2.2	<i>Metodologia adotada para avaliar o primeiro objetivo da pesquisa.....</i>	<i>54</i>
4.2.3	<i>Metodologia para alcançar o segundo objetivo.....</i>	<i>54</i>
4.2.3.1	<i>Resumo do modelo de análise fatorial no que se aplica ao estudo.....</i>	<i>55</i>
4.2.4	<i>Metodologia adotada para atingir o terceiro objetivo.....</i>	<i>58</i>
4.3	Resultados e discussão.....	60
4.3.1	<i>Resultados encontrados para o primeiro objetivo.....</i>	<i>60</i>
4.3.2	<i>Resultados obtidos para o segundo objetivo.....</i>	<i>62</i>
4.3.3	<i>Resultados obtidos para o terceiro objetivo.....</i>	<i>64</i>
4.4	Conclusão.....	67
5	VULNERABILIDADES INDUZIDAS NA REGIÃO DO MATOPIBA.....	69

5.1	Introdução.....	71
5.2	Materiais e métodos.....	73
5.2.1	<i>Definição dos indicadores de vulnerabilidade e coleta de dados para o MATOPIBA.....</i>	73
5.2.2	<i>Estimação dos pesos dos indicadores via análise fatorial por componentes principais.....</i>	75
5.2.3	<i>Fundamentação teórica da análise fatorial no que se aplica o estudo.....</i>	77
5.2.3.1	<i>Modelo de Análise Fatorial.....</i>	77
5.2.3.2	<i>Testes de Adequação.....</i>	77
5.2.3.3	<i>Procedimento de Estimação em Duas Etapas.....</i>	78
5.2.3.4	<i>Cálculo dos Pesos (Scores Fatoriais).....</i>	79
5.2.3.5	<i>Classificação em Quintis.....</i>	79
5.3	Resultados e discussão.....	80
5.4	Conclusão.....	85
6	MUDANÇAS NO USO E COBERTURA DA TERRA NO MATOPIBA: AVALIAÇÃO GEOESPACIAL.....	87
6.1	Introdução.....	89
6.2	Materiais e métodos.....	92
6.2.1	<i>Área de estudo.....</i>	92
6.2.2	<i>Abordagem do uso e cobertura da terra e suas transições.....</i>	92
6.3	Resultado e discussão.....	95
6.3.1	<i>Avaliação do uso e cobertura da terra na região do matopiba entre 1985 e 2023.....</i>	95
6.3.2	<i>Transições do uso e cobertura da terra.....</i>	102
6.4	Conclusão.....	104
	REFERÊNCIAS.....	108
7	CONCLUSÃO GERAL.....	106
	APÊNDICE A - RANKING DECRESCENTE DOS 337 MUNICÍPIOS DA REGIÃO DO MATOPIBA EM IVI.....	129

1 INTRODUÇÃO GERAL

No processo de modernização da agricultura brasileira, a soja foi a cultura eleita como carro-chefe das mudanças na base técnica da produção. Ancorado em políticas de incentivo governamental, crédito rural subsidiado, pesquisa e desenvolvimento tecnológico, e programas de expansão agrícola, houve considerável aumento da produção com elevados níveis de produtividade, possibilitando a expansão dessa produção por diferentes áreas do território brasileiro (Araújo *et al.*, 2019; Lemos, 2020; Lopes *et al.*, 2021; Nepomoceno & Carniatto, 2022; Santos *et al.*, 2024).

Desde os anos de 1970, o agronegócio da soja no Brasil é cenário de expansão no setor agrícola, ocupando atualmente o primeiro lugar como produtor mundial do grão (EMBRAPA, 2022). Configurando-se como o principal produto agrícola da pauta das exportações brasileiras e o maior responsável pelo aumento da colheita nacional de grãos (Espíndola; Cunha, 2015). A expansão das áreas destinadas ao cultivo de soja vem ocorrendo de forma rápida e consistente no território brasileiro, especialmente nas regiões do Cerrado, especificamente na nova fronteira agrícola composta pelos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, formando o acrônimo MATOPIBA e consolidando-se no território a partir dos anos 2000 (Santos; Naval, 2022).

A elevada produção de soja brasileira foi direcionada para o atendimento do mercado mundial, onde as suas exportações tiveram um salto quantitativo significativo, tanto em volume como em receita. Espera-se, para a safra de 2024/25, que as exportações de soja devem ficar por volta de 105,54 milhões de toneladas (CONAB, 2024). Segundo a análise da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), o Brasil e os Estados Unidos são atualmente os dois maiores produtores mundiais de soja, com volumes de produção semelhantes. No entanto, para o período de 2020-2029, projeta-se que o cultivo de soja no Brasil crescerá a uma taxa geométrica anual de 1,5% ao ano, um ritmo mais acelerado do que nos Estados Unidos, onde o crescimento estimado é de modestos 0,6% ao ano (OCDE-FAO, 2020).

O cultivo de soja na região Norte-Nordeste, onde se insere o Cerrado do MATOPIBA, alcançou 5.288,5 mil hectares na safra de 2022/23, o que significou um crescimento de 9,58% em relação à safra anterior. Em relação à produção de soja no Norte-Nordeste, apresentou incremento de 11,2% em comparação à safra passada e atingindo 18.943,14 mil toneladas (IBGE / PAM, 2023).

Diante desse contexto de crescimento significativo da produção de soja no MATOPIBA, é interessante ressaltar que todo esse progresso econômico se encontra numa região que apresenta 91% de área do bioma do Cerrado, o segundo maior bioma da América Latina, com rica biodiversidade e grande importância para a preservação climática e dos recursos naturais imprescindíveis para a espécie humana. As áreas complementares ocupadas com soja nos biomas que compõem o MATOPIBA representam 7,3% de área do bioma da Amazônia e 1,7% do bioma da Caatinga (Lahsen, Bustamante, Dalla-Nora, 2016; Sano *et al.*, 2019). É interessante ressaltar que a expansão da produção da soja não se encontra mais no bioma Amazônico, mas na região do MATOPIBA, que tem vegetação predominantemente de Cerrado. No país, a produção de soja no Cerrado corresponde a 55,14%, em comparação a somente 14,59% na Amazônia. Dos 14,4% de área plantada de soja no Brasil, 6,5% se encontram na região do MATOPIBA (Lima *et al.*, 2019).

As mudanças no uso da terra no bioma do Cerrado já equivalem a 50% de perda da cobertura nativa, intensificadas com a modernização e expansão do setor agrícola, contribuindo para o avanço do desmatamento e às queimadas, bem como o uso de defensivos agrícolas químicos em larga escala e emissão totais de dióxido de carbono no Brasil (Lahsen, Bustamante, Dalla-Nora, 2016). Entre os anos de 2001 a 2019, a região do MATOPIBA contribuiu com aproximadamente 45% da perda da vegetação nativa do Cerrado brasileiro, sendo necessária a elaboração de uma moratória visando preservar os ecossistemas originais, seguindo procedimento semelhante à moratória da soja que foi feita para a Amazônia. Somente 8% do Cerrado possui áreas protegidas, enquanto no bioma da Amazônia esse percentual chega a 46% (Rausch *et al.*, 2019; Pivello *et al.*, 2021).

A transformação da vegetação nativa do Cerrado provoca impacto em diversos serviços ecossistêmicos. A remoção de árvores com raízes profundas e vegetações rasteiras causa alteração na armazenagem de carbono e evapotranspiração, contribuindo para o aumento da temperatura local e assoreamento de solos, o que pode provocar redução na produtividade da terra utilizada para as atividades agrícolas. O desmatamento continuado ameaça também diversas espécies de animais e plantas nativos, bem como o abastecimento de água no Cerrado. Além disso, a capacidade do Brasil de alcançar as metas do tratado climático para emissões de gases de efeito estufa, pode ser prejudicado com a redução dos estoques de carbono da biomassa remanescente (Aguilar *et al.*, 2016; Rausch *et al.*, 2019).

Devido à importância que este tema exprime para os quatro estados que compõem a região e para os biomas brasileiros, bem como aspectos socioeconômicos e ambientais, o presente trabalho visa contribuir para uma melhor compreensão da relação entre a produção de

soja e a emissão dos gases do efeito estufa na região do MATOPIBA, visando a interdisciplinaridade das dimensões ambientais, socioeconômicas e políticas. O estudo propõe-se a investigar tais relações, abordando questões sobre o impacto da produção de soja nas emissões de gases de efeito estufa, variações nos padrões espaciais de produção e alterações na cobertura nativa do Cerrado ao longo do tempo, assim como a correlação entre a produção de soja e os impactos ambientais e socioeconômicos da região.

Com isso, a pesquisa apresenta como objetivo geral avaliar os impactos da evolução da produção de soja sobre as áreas colhidas com lavouras tradicionais praticadas nos municípios em que se estende a região do MATOPIBA, bem como aferir a emissão de gases do efeito estufa, e se houve mudanças na cobertura vegetal dessa região ao longo do período analisado.

Para guiar a investigação, o estudo apresenta as seguintes hipóteses: As áreas destinadas à produção de soja expandiram-se por meio de avanços sobre áreas antes ocupadas por vegetação nativa e por agricultores familiares que cultivavam lavouras alimentares tradicionais; Os municípios que fazem parte do MATOPIBA apresentaram diferenciais importantes na emissão de gases do efeito estufa; Existe uma correlação positiva entre a expansão da produção de soja e os impactos ambientais e socioeconômicos nos municípios da região do MATOPIBA.

Para alcançar o objetivo geral e verificar as hipóteses, o estudo está estruturado em quatro capítulos que abordam de forma detalhada os objetivos específicos da pesquisa: O primeiro capítulo analisa a dinâmica temporal do avanço do cultivo de soja sobre áreas de vegetação nativa e áreas anteriormente cultivadas com lavouras alimentares tradicionais na região do MATOPIBA, utilizando o modelo shift-share e dados da PAM e MapBiomas. O segundo capítulo investiga os fatores que influenciam as emissões e reduções de GEE na produção agropecuária da região do MATOPIBA ao longo do intervalo entre os Censos Agropecuários de 2006 e 2017. O terceiro capítulo afere as vulnerabilidades socioeconômicas dos municípios do MATOPIBA, por meio do Índice de Vulnerabilidade Induzida (IVI_MATOPIBA). Por fim, o quarto capítulo analisa a evolução espacial e temporal do uso e da cobertura da terra, bem como a transição no período de 1985 a 2023.

Dessa maneira, o estudo revela importantes relações de causa e efeito que podem orientar decisões estratégicas, promovendo um equilíbrio mais sustentável entre crescimento econômico e conservação ambiental.

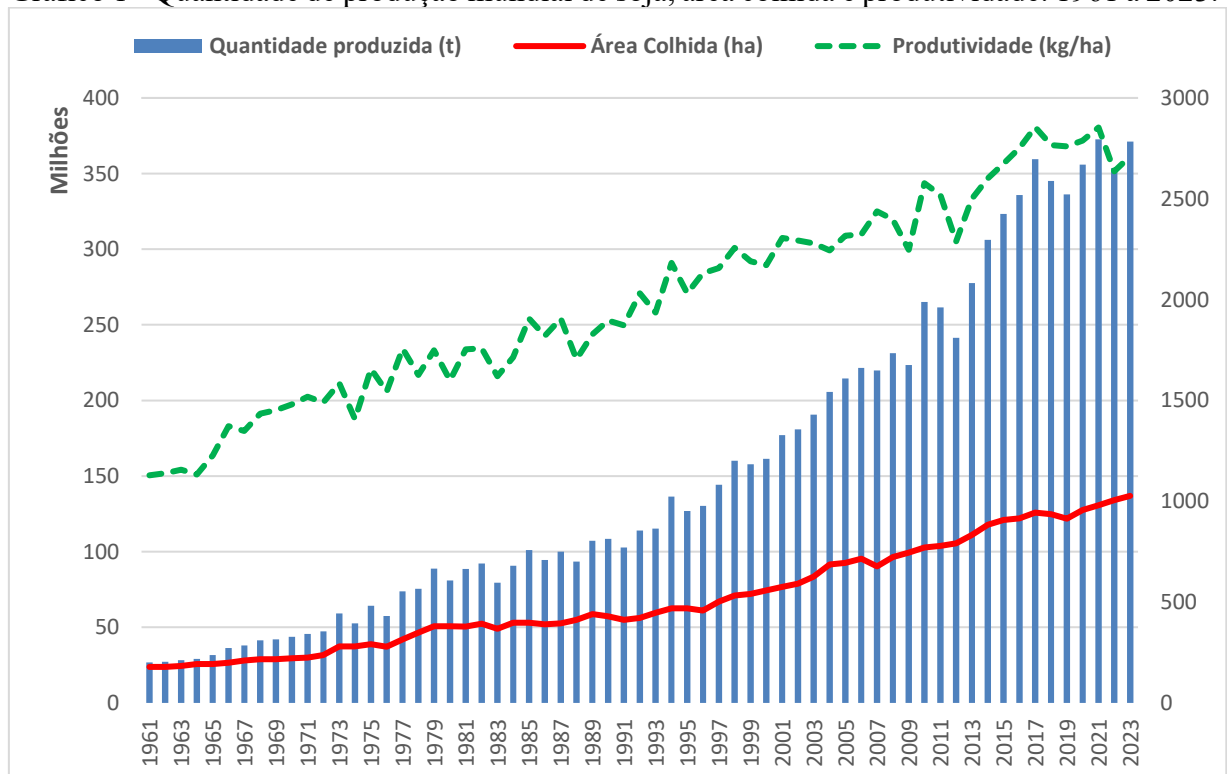
2 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção, são discutidos a expansão da soja no Brasil e no mundo, destacando o papel da região do MATOPIBA como uma nova fronteira agrícola. Além disso, apresenta a ocupação desta região, seus impactos ambientais e a dinâmica da produção de soja na região.

2.1 A soja no Brasil e no mundo

A soja (*Glycine max (L.) Merr.*) tem sua origem na China, onde foi cultivada há mais de 5.000 anos, sendo introduzida nos EUA e Brasil nos últimos 100 anos, os quais se tornaram os maiores produtores mundiais de soja. Além da sua importância para pecuária e aquicultura, sendo uma cultura de sementes oleaginosas, a soja é uma fonte de proteína para a alimentação humana, na composição de rações para animais de criação e matéria-prima de biocombustível. Devido o seu crescente consumo, a demanda por sua produção foi se elevando no decorrer dos anos, como está ilustrado no Gráfico 1 que mostra um recorte das trajetórias das quantidades produzidas, das áreas colhidas e das produtividades de soja no mundo no período 1961/2023 (Masuda, Goldsmith, 2009; Pagano, Miransari, 2016).

Gráfico 1 - Quantidade de produção mundial de soja, área colhida e produtividade: 1961 a 2023.

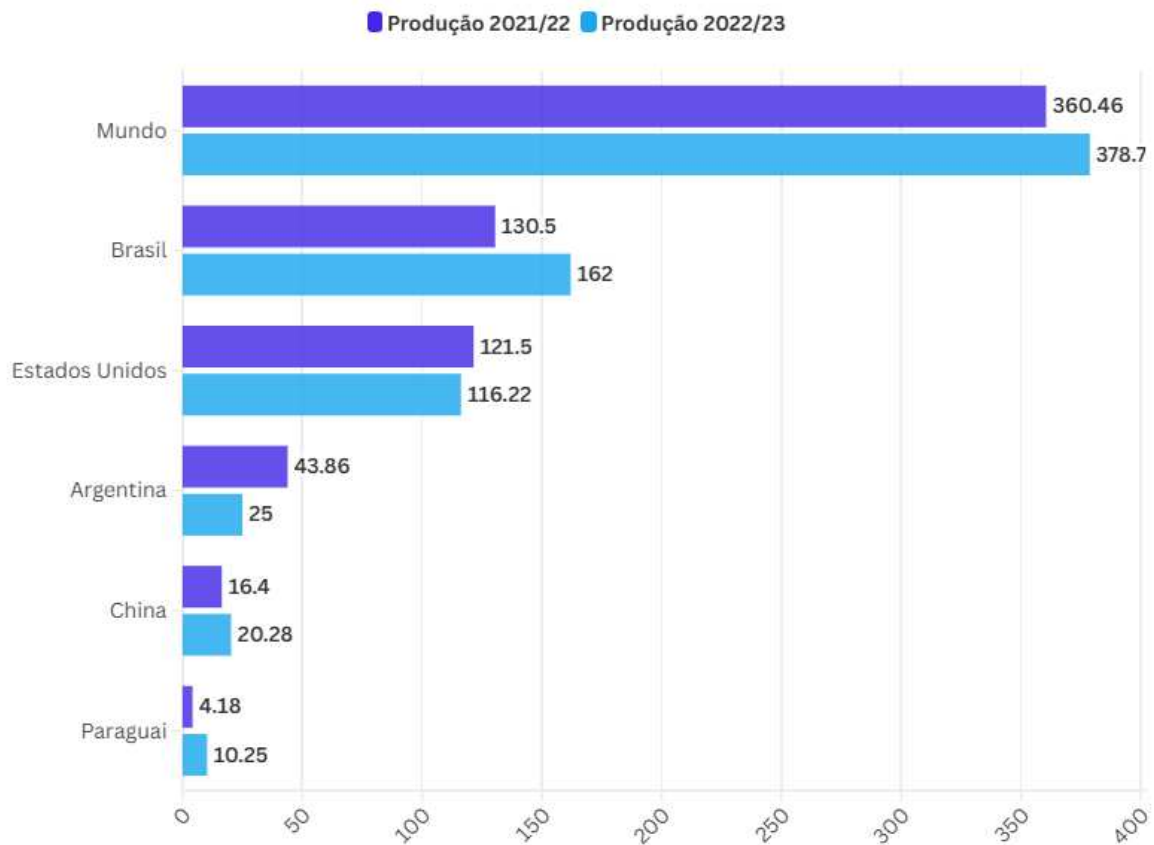


Fonte: FAOSTAT e USDA (2024).

Conforme demonstra o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (*United States Department of Agriculture - USDA*, na sigla em inglês) o mundo produziu, na safra de 2022/23, aproximadamente 378,7 milhões de toneladas de soja (Gráfico 2), ocupando uma área de 137 milhões de hectares (USDA, 2024).

Os países que são atualmente os maiores produtores mundiais de soja são: Brasil, Estados Unidos, Argentina, China e Paraguai. Na produção de 2022/23 o Brasil, superou os EUA e tornou-se o maior produtor do grão (Gráfico 2) (USDA, 2024; EMBRAPA, 2022).

Gráfico 2 - Produção de soja e os principais países produtores do grão (milhões de toneladas).



Fonte: USDA (2024).

A intensificação da expansão da produção de soja na América Latina teve seu início a partir da década de 1990, principalmente no Brasil, Argentina e Paraguai (García-López; Arizpe, 2010). No Quadro 1, pode-se observar o crescimento de área e da produção de soja, entre os anos de 1990 e 2023, destacando-se Brasil e Paraguai, que apresentaram um crescimento na produção, de 696,5% e 550,8%, respectivamente. Em relação à expansão de área, tem-se, observou-se que o Brasil, o Paraguai e a Argentina, se expandiram em 286,1%,

272,4% e 190,9%, respectivamente. Esse aumento tanto de área como da produção reflete a crescente participação da América do Sul na produção mundial de soja.

Quadro.1 - Produção e área de soja dos maiores produtores mundiais, nos anos de 1990 e 2023.

Países	Soja					
	Produção (1000 MT)			Área (1000 HA)		
	1990	2023	Var. %	1990	2023	Var.%
Argentina	10.750	25.000	132,6	4.950	14.400	190,9
Brasil	20.340	162.000	696,5	11.550	44.600	286,1
China	10.227	20.284	98,3	8.034	10.244	27,5
Paraguai	1.575	10.250	550,8	980	3.650	272,4
Estados Unidos	52.354	116.221	122,0	24.094	34.873	44,7

Fonte: USDA (2024).

A produção de soja na Argentina ocorreu de forma não muito expressiva no início da década de 1940, de uma forma mais experimental e não importante à economia do país. Foi a partir de 1970 que a área destinada à cultura de soja aumentou e de fato se projetou um cenário voltado para essa produção. De 79.800 hectares para a safra de 1971/72 saltou para 2.040.000 hectares na safra de 1981/82. Consolidando-se na década de 1990 em que a produção de soja se tornou mais sistemática e estruturada no agronegócio. Hoje, metade das terras agrícolas no país são destinadas para a produção de soja e 95% do produto é destinado às exportações (Cadenazzi, 2009; Galván, Ribeiro, 2020).

No Paraguai, a soja foi introduzida em 1921, porém de forma inexpressiva. De acordo com dados do Censo Agropecuário em 1956 foram destinados ao plantio de soja em torno de 250 hectares e uma produção que ficou abaixo de 200 toneladas. Desde então, diversas sinergias ocorreram para que a partir de 1990 a expansão da soja no país se tornasse contínua. De 1990 a 2023 houve um crescimento incessante da área plantada que se elevou de 980 mil hectares para 3.650 mil hectares (Quadro 1). Atualmente, a cada 3 hectares plantados com lavouras no Paraguai, 2 hectares são de soja, demonstrando o destaque do grão na agricultura nacional. É importante salientar que o sustento desse crescimento se deu pelo aumento da demanda internacional, principalmente da China. Com isso, o Paraguai se tornou o quarto maior exportador de soja (Wesz Junior, 2022; USDA, 2022; Vera, Mereles, Wesz Junior, 2017; Bosio, 2015).

A chegada da soja ao Brasil se deu em 1882, trazida dos EUA. No entanto, foi a partir da década de 1940 que o Brasil entrou nas estatísticas mundiais como produtor do grão.

Apresentando aumento na produção de soja que variou de 457 toneladas no ano de 1941 para 25.881 toneladas em 1949 (Dall'agnol, 2016).

A expansão da soja brasileira teve início na década de 1960, por meio de um programa governamental para impulsionar a produção de trigo no Rio Grande do Sul. A soja também foi beneficiada por esse programa como forma de otimizar o uso da terra, no verão entrou a safra de soja e no inverno a safra de trigo. Outro fator importante que contribuiu para a expansão da soja no Brasil foi o atrativo preço no mercado internacional na década de 1970 (Cattelan, Dall'agnol, 2018)

Desde a década de 1970, principalmente, o Brasil vem se transformando, por meio de políticas públicas e desenvolvimento de infraestrutura, em uma das potências agrícolas mundiais. Tornando-se um dos maiores produtores de soja, carne bovina, milho e diversas outras commodities. No entanto, parte considerável desse crescimento, tem sido por meio de avanços em áreas das fronteiras agrícolas da Amazônia e do Cerrado do Brasil (Spera, 2017; Coe *et al.*, 2017).

A produção de soja concentrou-se até 1980 ao sul do Brasil e expandiu-se a partir desta década para o Centro-Oeste. Na década de 1990, a soja avançou para o Norte-Nordeste do país. O cultivo de soja e outras culturas fizeram que o Brasil se transformasse de importador de alimentos, em 1960, para um dos maiores exportadores nos anos 2000. É fundamental destacar o poderio da soja no país. Com efeito, em 1970, a área destinada à soja (1,3 milhões de toneladas) foi inferior às sete principais culturas da década. Atualmente, a área destinada à produção de soja é similar à soma das áreas das sete culturas mais plantadas na época (milho, trigo, arroz, feijão comum, café, algodão e cana-de-açúcar) (USDA, 2022; Cattelan, Dall'agnol, 2018).

Originária da China, a soja foi cultivada há mais de 5.000 anos em diversas áreas do seu extenso território (Qiu; Chang, 2010). No entanto, a produção de soja no país passou por diversas oscilações (Zhuang *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2016). De 1980 a 2004 houve um aumento na produção do grão de 7,9 milhões de toneladas para 17,4 milhões, porém esse crescimento não foi contínuo. De 2004 a 2015, foi observada uma redução na área destinada à soja e uma expansão de área para a produção de milho, devido aos incentivos do governo e seu maior rendimento econômico (Xu *et al.*, 2020; Zhang; Lu, 2020).

A existência da dependência chinesa sob a soja é recente na história do país. Sendo o maior produtor até a segunda metade do século XX, permanecendo como exportadora de soja até a década de 1990 e sofrendo mudanças a partir dos anos 2000. A partir desse período, com a abertura ao mercado internacional e o aumento da demanda por soja, a China passou de

concorrente no mercado mundial de produção de soja para maior consumidora da soja produzida nos EUA, Brasil e Argentina (Giraud, 2019; Jamet, Chaumet, 2016). Vale ressaltar que, que as importações de soja da China correspondem a mais de 60% das exportações mundiais totais. Estima-se que as importações alcancem 126 milhões de toneladas em 2028/29 (Wu *et al.*, 2020; Gale, Valdes & Ash, 2019).

Nos Estados Unidos, conforme o relatório do *National Oilseed Processors Association* (NOPA), o impacto econômico da soja na economia do país foi de US\$ 115,8 bilhões por ano, durante as safras de 2014/15 a 2016/17, e envolvendo uma média de 357.000 pessoas (LMC INTERNATIONAL, 2019). No entanto, a soja tornou-se uma das principais culturas no país no início do século XX por incentivos do botânico e agrônomo George Washington Carver que promoveu a produção devido ao seu alto teor de proteína e benefícios ao solo quando inserida em plantios de rotação de culturas (Osborne, Mendel, 1917; Vieira, Chen, 2021).

O aumento na demanda interna e externa da soja marcou o início da importância da soja nos Estados Unidos e com isso, foram desenvolvidas diversas pesquisas visando melhoramentos genéticos de plantas, fisiologia, nutrição, doenças relacionadas aos cultivos e pesquisas envolvendo as disponibilidades de nutrientes do solo. As pesquisas e a inserção da mecanização no manejo da cultura resultaram em aumento, de 80%, da produção de soja em todo o território dos Estados Unidos nos anos de 1941 e 1942, tornando o país o maior produtor mundial do grão pela primeira vez (Bandara *et al.*, 2020; Vieira, Chen, 2021).

2.2 MATOPIBA: a ocupação de uma nova fronteira agrícola

O processo de ocupação da região do MATOPIBA iniciou a partir da década de 1970, por incentivos como o Programa de Desenvolvimento dos Cerrados (POLOCENTRO) cujo objetivo era impulsionar a economia da região, por meio do crédito rural, desenvolvimento de pesquisas e tecnologias, assistência técnica e investimentos em infraestrutura (Wagner, 1982; Lemos, 2020; Schneider, Marques & Peres, 2021). Em 1974, outro programa voltado para o desenvolvimento dos Cerrados, que se destaca, é o Programa de Cooperação Nipo-Brasileira para o Desenvolvimento dos Cerrados (PRODECER), que envolveu os governos do Brasil e do Japão, colaborando com as transformações socioeconômicas e para o crescimento da agricultura brasileira (Santos, 2016).

O crescimento da produção de soja em áreas de Cerrado, observadas na década 1970, reflexo dos incentivos atribuídos à região, acompanhou a expansão deste cultivo na região do MATOPIBA que se deu a partir da década de 1990 (Bragança, 2018).

Com o intuito de fortalecer a expansão do cultivo da oleaginosa, o governo brasileiro, em 2015, estabeleceu o Plano de Desenvolvimento Agropecuário (PDA) na região do MATOPIBA, por meio do Decreto Federal n.º 8447, de 6 de maio de 2015, que visava “promover e coordenar políticas públicas voltadas ao desenvolvimento econômico sustentável fundado nas atividades agrícolas e pecuárias que resultem na melhoria da qualidade de vida da população” (BRASIL, 2015). O plano tinha como premissas a orientação de projetos, programas e ações governamentais direcionado às atividades agropecuárias (Bolfe *et al.*, 2016).

Concomitantemente, por meio do Grupo de Inteligência Territorial Estratégica (GITE) da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) foram desenvolvidas diversas pesquisas visando compreender todos os fatores que envolvem os sistemas agropecuários e socioeconômicos da região. Além disso, a EMBRAPA definiu a área geoeconômica do MATOPIBA, constituída por 31 microrregiões, resultando em 337 municípios e representando, atualmente, um total de 73 milhões de hectares. A região é representada por 135 municípios no Maranhão, 139 em Tocantins, 33 no Piauí e 30 na Bahia (Quadro 2) (Miranda, Magalhães, Carvalho, 2014; Bolfe *et al.*, 2016; Souza, Pereira, 2019).

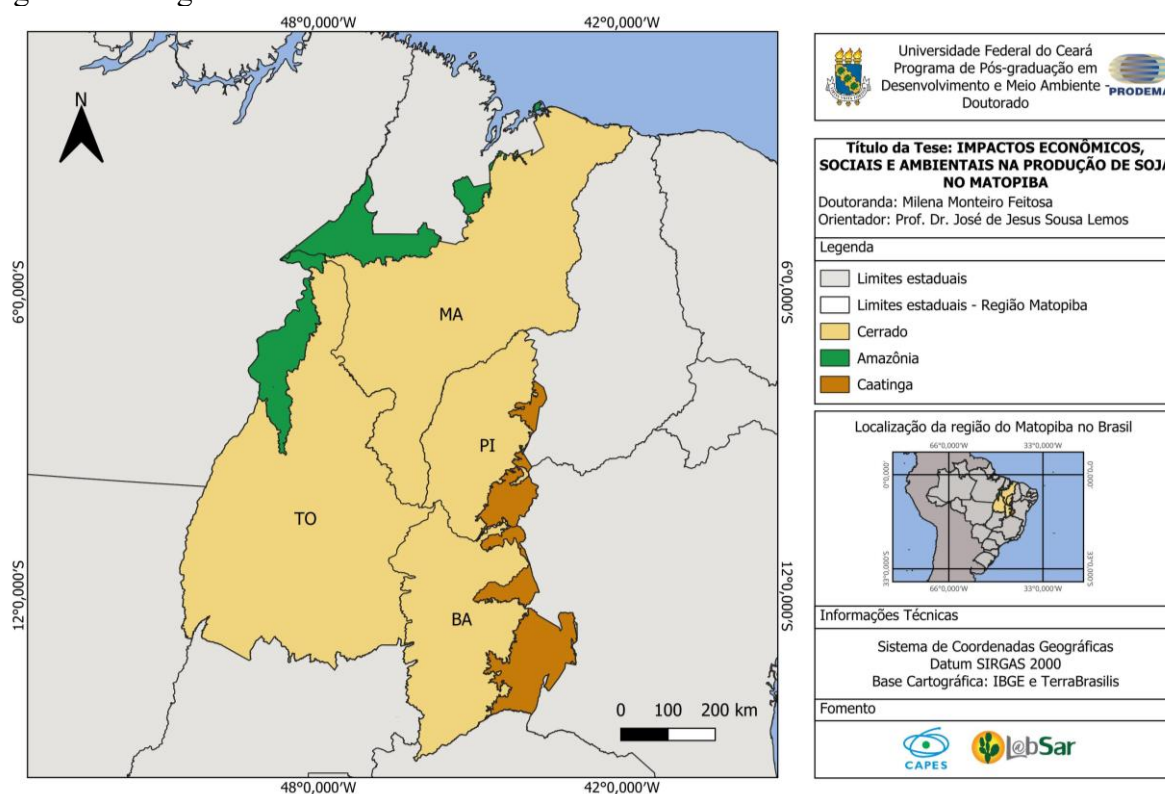
Quadro 2 - Distribuição territorial da região do MATOPIBA por estado.

Estados	Microrregiões	Municípios	Área (ha)
Maranhão	15	135	23.982.345,86 (32,77%)
Tocantins	8	139	27.772.052,07 (37,95%)
Piauí	4	33	8.204.588,15 (11,21%)
Bahia	4	30	13.214.498,49 (18,06%)
Total	31	337	73.173.484,57

Fonte: Com base nos dados de Miranda, Magalhães e Carvalho (2014).

A região do MATOPIBA (Figura 1) se encontra representada por, aproximadamente, 91% (66,5 milhões de hectares) no bioma do Cerrado, um dos *hotspots* mundiais apresentando mais de 4.800 espécies, entre plantas e vertebrados (Strassburg *et al.*, 2017), 7,3% no bioma da Amazônia (5,3 milhões de hectares) e 1,6% (1,2 milhões de hectares) no bioma da Caatinga (Polizel *et al.*, 2021).

Figura 1 - A região do MATOPIBA e seus biomas.



Fonte: Elaborada pela autora, de acordo com os dados do IBGE e TerraBrasilis.

Considerado o segundo maior bioma da América Latina, o Cerrado, além de representar biodiversidade de espécies, representando 5% de todas as espécies encontradas no mundo, é conhecido também por ser o “berço das águas” do Brasil, pois possui 43% de água superficial fora da região Amazônica, três das maiores bacias hidrográficas da América Latina. O bioma do Cerrado também tem sua importância para o clima, no entanto, devido à dinâmica da mudança do uso da terra, ocorre a redução nos estoques de carbono e elevam-se as emissões de GEE para a atmosfera (Carvalho *et al.*, 2010; Strassburg *et al.*, 2017; Lopes, Lima & Reis, 2021; Schneider, Marques & Peres, 2021).

Comparado com o bioma Amazônico, o Cerrado possui maior concentração da produção de soja do Brasil. Segundo dados de 2015, o Cerrado concentrou aproximadamente 48% da produção da soja brasileira, enquanto o bioma Amazônico detém apenas 13% (Soterroni *et al.*, 2019). A região do MATOPIBA, principal área de expansão da soja no país, evidenciou uma expansão de área de 484,37% entre os anos de 2000 e 2023. A projeção para as próximas décadas, é de crescimento da produção de soja (IBGE, 2023).

Em relação às terras protegidas, observa-se que o Cerrado possui apenas 7,5% de áreas públicas protegidas, enquanto o bioma Amazônico possui 46%. Conforme o Código Florestal do Brasil, 20% das terras privadas no bioma do Cerrado, devem possuir reservas para

preservação, em comparação aos 80% no bioma da Amazônia (BRASIL, 2012; Nepstad *et al.*, 2014; Strassburg *et al.*, 2017; Soterroni *et al.*, 2019).

Correlacionado aos aspectos ambientais, a região do MATOPIBA é composta por diversas áreas legalmente atribuídas, e com elas surgem problemas sociais importantes. Essas áreas são compostas por terras indígenas, quilombolas, assentamentos rurais e unidades de conservação federais e estaduais, representando 24% do território. Em contrapartida, a região possui 324.326 estabelecimentos agrícolas, apresentando 33.929.100 hectares, aproximadamente, duas vezes a soma de todas as outras áreas (Quadro 3) (Miranda, Magalhães & Carvalho, 2014).

Quadro 3 - Áreas e territórios atribuídos à região do MATOPIBA.

Identificação	Quantidade	Área (ha)
Estabelecimentos Agrícolas	324.326	33.929.100
Unidades de Conservação	46	8.334.679
Terras Indígenas	35	4.157.189
Assentamentos	745	2.782.755
Quilombolas	36	250.330
Total	325.188	49.454.053

Fonte: Com base nos dados de Miranda, Magalhães e Carvalho (2014).

Segundo a Embrapa, 20 milhões de pessoas, localizadas em áreas de Cerrado, uma das maiores taxas de população rural no Brasil, são consideradas populações tradicionais e têm como meio de sobrevivência o uso dos recursos naturais (Heck; Menezes, 2016). No entanto, essas populações tradicionais perderam, no início da década de 1980, o acesso às terras altas, terras propícias à agricultura mecanizada, para assim ocuparem as terras baixas. Além disso, as práticas tradicionais entraram em conflito com as políticas de conservação empregadas no final da década de 1990 (Eloy *et al.*, 2015; Schneider, Marques, Peres, 2021).

O processo de modernização da agricultura, constituído no início da década de 1970, ocasionou inúmeras transformações direcionadas à ocupação do espaço, principalmente, levando a ruptura de métodos tradicionais de uso da terra para a implantação de tecnologias na produção agrícola. Tais mudanças, resultaram em conflitos, principalmente, sobre o acesso às riquezas naturais (Haesbaert, 1997; Reis; Pertile, 2019).

Foi nesta conjuntura que o MATOPIBA foi delimitado, para atender às demandas mundiais, modificando o espaço e as relações sociais da região. O resultado de tais transformações apresentaram impactos multidimensionais, sendo eles: ambientais, econômicos, sociais e culturais (Pereira & Pauli, 2019).

A mudança no uso da terra no Cerrado e as transformações estruturais devido à intensificação da produção de soja tornaram-se um dos principais fatores de impacto na região do MATOPIBA. O avanço da produção de soja impulsiona diversas mudanças ambientais, como o aumento do desmatamento da vegetação nativa e contribui para a ocorrência de instabilidades à disponibilidade e ao acesso aos recursos hídricos, ao mesmo tempo em que gera dinâmicas econômicas e sociais, atraindo mão de obra e investimentos. Embora esta expansão promova crescimento econômico, também impacta a conservação dos recursos naturais e mudanças no estilo de vida das populações tradicionais (Butazo et al., 2018; Pereira & Pauli, 2019; Gasparinetti & Bakker, 2020; Rodrigues & Pugas, 2021).

2.3 Dinâmica da soja e impactos ambientais na região do MATOPIBA

Segundo a Produção Agrícola Municipal (PAM) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), na safra de 2023, os estados que formam a região do MATOPIBA somaram 4.303,752 mil hectares de área plantada de soja e produção de 14.586.419 de toneladas, portanto com uma produtividade média de 3.389 kg.ha⁻¹. O estado da Bahia é o maior produtor de soja da região (6.078.010 de toneladas) e possui a maior área plantada do grão (1.622.475 hectares), com uma produtividade de 3.746 kg.ha⁻¹, representando 42% do MATOPIBA, em comparação aos demais estados da região (Lima *et al.*, 2019; IBGE, 2022).

O resultado desse intenso crescimento agrícola, gerou 26.861 alertas de desmatamento que somaram em área 1.110.326 hectares no bioma do Cerrado no Brasil apenas em 2023, conforme o relatório anual do desmatamento no Brasil, que representou um crescimento de 67,7% da área desmatada e 326,6% no número de alertas em relação ao ano de 2022. Entre os biomas mais desmatados do Brasil nos últimos cinco anos, a Amazônia e o Cerrado correspondem juntos a 85% (Mapbiomas, 2023).

De acordo com o PRODES Cerrado, já foram desmatados, no período de 2000 a 2023 do bioma do Cerrado, aproximadamente 241.114,69 km² na região do MATOPIBA. Os dados de desmatamento por estado no Bioma Cerrado na região do MATOPIBA, apresentou um total de 87.452,06 km² localizados no estado de Maranhão, 89.037,29 km² no estado de Tocantins, 20.699,77 km² no estado de Piauí e 43.925,57 km² no estado da Bahia no acumulado de 2000-2023 (INPE, 2023).

Observa-se que, ao mesmo tempo que a intensificação da agricultura, principalmente nos biomas Amazônia e Cerrado, teve impactos positivos em termos

econômicos, por outro lado, tem apresentado impactos ambientais, surgindo uma grande dificuldade de reduzir emissões de carbono via redução do desmatamento ilegal. A proteção do carbono compreendido nas florestas remanescentes dos biomas Amazônia e Cerrado são a chave do sistema climático, pois determinarão uma maior estabilidade para o clima e as chuvas características da região (Coe *et al.*, 2017; Goldsmith, 2017). Evidencia-se que ocorrendo as mudanças climáticas na região, resultando em um clima quente e seco, irá impactar na produtividade da agricultura, bem como na biodiversidade, na bioenergia e na hidroenergia da região (Duffy *et al.*, 2015; Tateishi; Bragagnolo; De Faria, 2020; Flach *et al.*, 2021).

Outros fatores de uso da terra também causam impactos ambientais como a alta intensidade de tráfego e peso das máquinas de trator causando a compactação do solo que, de acordo com Botta *et al.* (2010), além de alterar as propriedades físicas do solo, o rendimento da produção de soja diminuiu, pois o solo compactado dificulta o crescimento das raízes, por conseguinte, limitando o consumo de água pelas plantas.

O aumento da mecanização contribui para a compactação do solo ameaçando sua fertilidade em áreas cultivadas, ao reduzir a sua macroporosidade, bem como modifica ou reduz a atividade biológica da fauna e flora do solo. Sendo assim, interfere em questões relevantes para a precaução da degradação do solo e redução de rendimentos (Bottinelli *et al.*, 2014; Chamen *et al.*, 2015).

O uso de defensivos agrícolas reduz as perdas provocadas pela incidência de pragas e doenças, garantindo a produtividade das produções agrícolas, contudo apesar de representar um alto custo para o agricultor, o uso inadequado desses agroquímicos pode resultar em diversos efeitos secundários na biodiversidade do solo e da fauna nativa, risco para a saúde do agricultor e segurança dos alimentos usufruídos pela população (Terra *et al.*, 2020; Maggi, Tang, 2021).

Segundo Prosser *et al* (2020) e Andrade *et al* (2021), o uso inadequado desses agroquímicos nas práticas agrícolas pode atingir os corpos de água doce, por meio do escoamento devido, principalmente às chuvas que transportam os resíduos, sobretudo embalagens descartadas inadequadamente, causando risco ambiental aos sistemas aquáticos.

A produção de soja em uma área leva a diversos resultados socioeconômicos e ambientais. De acordo com Silva *et al* (2021) a produção de soja envolve sistemas interdependentes de recursos, capital e pessoas, influenciando nas decisões de uso da terra.

É observado que a produção de soja no MATOPIBA tem excluído populações locais e pequenos agricultores, bem como comunidades indígenas dos resultados socioeconômicos dessa dinâmica agrícola, sendo necessário o emprego de políticas públicas,

além do crédito agrícola, a adoção de políticas que visem o empreendedorismo local, estimulando a compra de insumos agrícolas em níveis locais, aspirando o desenvolvimento da economia local (Lopes, Lima & Reis, 2021).

Segundo Flach *et al.* (2021) a produção de soja no Brasil está em crescimento, porém manter a sustentabilidade do crescimento não está tão consolidada, devido aos fatores externos, consequências da conversão da cobertura nativa em terras agrícolas, bem como os impactos sociais e ambientais provenientes da conversão.

Contudo, para que se mantenha a sustentabilidade da expansão da soja no Brasil, é necessária a utilização de técnicas agrícolas que protejam o solo e que o permitam se manter produtivo ao longo dos anos. Inúmeros são os sistemas de manejo cujo objetivo é proteger o solo da erosão e degradação. O Sistema de Plantio Direto (SPD) possui aspecto conservacionista e constitui ações como o revolvimento mínimo do solo, associado ao controle do uso de máquinas, assim como a rotação de culturas e a manutenção da palhada pertencente a cultura anterior na superfície do solo (Rodrigues, Pugas, 2021).

O Sistema de Plantio Direto (SPD) foi inserido no Brasil no começo da década de 1970 como técnica alternativa de preparação do solo e controle da erosão na rotação de culturas de trigo e soja na região Sul do país. Tal processo foi inserido tanto na pesquisa como na propriedade rural. Ganhando destaque e apresentando resultados técnicos mais consistentes a partir do início da década de 1980, passando de método alternativo para ser considerado um procedimento eficiente no controle da erosão e definido como um sistema de exploração agropecuário. Um sistema importante para a conservação do solo, em relação à erosão, e o aumento da produtividade, bem como demonstrando o potencial genético das culturas por maximizar o fator ambiente e de solo (Rodrigues, Pugas, 2021; Volf *et al.*, 2021).

No entanto, o sistema necessita de alguns pressupostos a serem alcançados para se obter êxito como a “sistematização da lavoura; manejo da fertilidade do solo; planejamento de um sistema de rotação de culturas; manejo de restos culturais e de culturas de cobertura de solo; estrutura de máquinas e implementos; e assistência técnica e atualização do usuário” (Kochhann, Denardin, 2000).

O Cerrado do Leste Maranhense, pertencente à região do MATOPIBA cuja principal produção é a soja, possui em sua abundância argissolos de textura leve, ocupando 5,8 milhões de hectares, sendo mais propensos à degradação e perda da capacidade de produção (Lumbreras *et al.*, 2015). O uso do sistema de plantio direto melhora a qualidade física do solo, assim como sua porosidade e retenção de água (Barbosa *et al.*, 2022).

Neste bioma também se destaca o sistema Integração Lavoura-Pecuária (ILP) que se adequa conforme o perfil e objetivos da fazenda, além de condições regionais e de propriedade, como infraestrutura, disponibilidade tecnológica, experiência do produtor e as condições climáticas e de solo. Na ILP são implantados diferentes sistemas produtivos de grãos, carne, leite, agroenergia, dentre outros, em uma mesma área. Neste sistema é importante a alternância do uso da terra entre lavoura e pecuária (Vilela *et al.*, 2021).

O sistema ILP é também conhecido como um modelo de exploração agropecuária, como o plantio direto, e ele se apoia na sinergia entre as culturas e a pecuária. Os benefícios promovidos com esse planejamento temporal e espacial da implantação dos diferentes sistemas produtivos são: aumento da matéria orgânica no solo, maior circulação e eficiência no uso de nutrientes, ruptura dos ciclos de doenças e pragas em geral, diminuição no custo da recuperação de pastagens em degradação e redução da intensidade da emissão de gases do efeito estufa (Sato *et al.*, 2019; Vilela *et al.*, 2011). Segundo Vilela *et al.* (2021, p .9), pode-se destacar três modalidades de ILP no Cerrado:

(1) fazendas de pecuária em que a introdução de culturas de grãos em áreas de pastagens tem por objetivo recuperar a produtividade dos pastos com custos menores (amortização dos custos de recuperação por meio da venda dos grãos); (2) fazendas especializadas em lavouras de grãos que adotam as gramíneas forrageiras para melhorar a cobertura de solo para o sistema de plantio direto e, na entressafra, podem, quando desejado, utilizar a forragem produzida na alimentação de bovinos; e (3) fazendas que, sistematicamente, adotam a rotação de pasto e lavoura para intensificar o uso da terra e se beneficiar do sinergismo entre as duas atividades.

Considerando a predominância dos sistemas agrícolas de grãos na região do Cerrado do MATOPIBA, a implantação do Sistema de Plantio Direto (SPD) tem sua fundamental importância como ferramenta na conservação do solo e da água, assim como a sustentabilidade produtiva (Bortolon *et al.*, 2016; Bonetti; Fink, 2020).

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), desde 2004, vem introduzindo os sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), nas principais microrregiões da região MATOPIBA. A introdução do fator floresta nos sistemas de integração gerou um conceito mais completo e com mais possibilidades de sinergia espaço-temporal (Cordeiro *et al.*, 2015). A parceria envolve desde produtores, universidades, assistência técnica e extensão rural a setores privados, possibilitando que as propriedades, que adotam o sistema de ILPF, se tornem Unidades de Referência Tecnológica (URTs) (Skorupa, Manzatto, 2019; Souza, Leite & Medeiros, 2021)

3 DINÂMICA TEMPORAL DA EXPANSÃO DA SOJA NO MATOPIBA (BRASIL): IMPACTOS SOBRE VEGETAÇÃO NATIVA E LAVOURAS ALIMENTARES TRADICIONAIS

RESUMO

O cultivo de soja, um dos grãos mais produzidos e consumidos no mundo, é também realizado no Brasil, numa região que representa 91% de área do bioma do Cerrado, o segundo maior da América Latina. As mudanças do uso e cobertura da terra estão entre as alterações globais mais significativas causadas pelo ser humano que impactam o meio ambiente e os ecossistemas. Neste sentido, o artigo tem como objetivo analisar a dinâmica temporal do avanço do cultivo de soja sobre áreas de vegetação nativa e áreas anteriormente cultivadas com lavouras alimentares tradicionais na região do MATOPIBA. O trabalho utilizou dados da PAM/IBGE, FGV e do MapBiomas. A metodologia utilizada foi o método *shift-share* para mostrar a dinâmica da evolução do valor da produção de soja, no desdobramento dos seus efeitos sobre as áreas com lavouras tradicionais e vegetação nativa. Os resultados obtidos mostram que, entre 1985 e 2022, a cultura da soja expandiu-se impulsionada pelo aumento da área plantada e pela produtividade, favorecida pelo uso de tecnologias agrícolas modernas. Contudo, essa expansão ocorreu, em parte, mediante o avanço sobre áreas antes ocupadas por vegetação nativa e redução nas áreas cultivadas de culturas tradicionais.

Palavras-chave: modelo *Shift-share*; vegetação nativa; lavouras alimentares tradicionais; valor da produção de soja.

TEMPORAL DYNAMICS OF SOYBEAN EXPANSION IN MATOPIBA (BRAZIL): IMPACTS ON NATIVE VEGETATION AND TRADITIONAL FOOD CROPS

ABSTRACT

Soybean cultivation, one of the world's most widely produced and consumed grains, is also significant in Brazil, particularly in a region encompassing 91% of the Cerrado biome, the second-largest in Latin America. Land use and land cover changes are among the most significant human-caused global alterations impacting the environment and ecosystems. In this context, this article aims to analyze the temporal dynamics of soybean cultivation's expansion into areas of native vegetation and areas previously used for traditional food crops in the MATOPIBA region. The study utilized data from PAM/IBGE, FGV, and MapBiomias. The methodology employed was the shift-share method to analyze the dynamics of the evolving value of soybean production, specifically breaking down its effects on areas with traditional crops and native vegetation. The results show that between 1985 and 2022, soybean cultivation expanded, driven by increases in planted area and productivity, which was supported by the use of modern agricultural technologies. However, this expansion occurred, in part, through encroachment upon areas previously occupied by native vegetation and a reduction in the areas devoted to traditional crops.

Keywords: shift-share model; native vegetation; traditional food crops; value of soybean production.

3.1 Introdução

A soja consolidou-se como uma das principais culturas do agronegócio brasileiro, desempenhando um papel fundamental na economia nacional e na balança comercial do país. Nas últimas décadas, o Brasil tem registrado expansão na sua produção de soja, tornando-se base da modernização agrícola do país. Tal fenômeno deve-se ao aumento na utilização de tecnologias avançadas, intensivas na utilização de sementes melhoradas, máquinas modernas e agroquímicos que impulsionaram produtividade do solo e abertura de novas fronteiras agrícolas (Oliveira, 2016; Cattelan & Dall'Agnol, 2018).

A expansão da soja no Brasil, iniciada na década de 1960, foi impulsionada por um programa governamental de incentivo ao trigo no Sul do país. Com a proposta de inserir a cultura da soja na estação de verão, promovendo a rotação de culturas com o trigo para maximizar o uso da terra e dos recursos. Essa estratégia foi fundamental para o crescimento dessa lavoura no Brasil. Além disso, a valorização do grão no mercado mundial, em meados da década de 1970, impulsionou a produção e a exportação da soja brasileira. Nesse período, a produção na região Sul saltou de 202 mil toneladas em 1960 para 8,9 milhões de toneladas em 1979. A partir das décadas de 1980 e 1990, a expansão da soja se intensificou com a ocupação da Região Centro-Oeste, devido à crescente demanda chinesa e europeia, consolidando o Brasil como um dos seus maiores produtores mundiais (Lathuillière *et al.*, 2014; Gazzoni & Dall'Agnol, 2018; Cattelan & Dall'Agnol, 2018; Langthaler, 2020; Santos, 2022).

A área cultivada com soja no Brasil aumentou entre 2001 e 2019, passando de 13,4 milhões para 34,2 milhões de hectares, com uma taxa média de crescimento de 1,2 milhões de hectares por ano. As projeções indicam que essa tendência deve continuar, com um aumento de 50% na produção até 2050, o que exigirá a incorporação de mais 20 milhões de hectares, principalmente em regiões da América do Sul (Maranhão *et al.*, 2019; Song *et al.*, 2021; Guarenghi *et al.*, 2022).

Segundo a Conab, a safra de soja 2022/2023 no Brasil atingiu um novo recorde, totalizando 154,6 milhões de toneladas. Esse resultado foi alcançado devido a diversos fatores, como condições climáticas favoráveis, o emprego de tecnologia e o aumento da área cultivada. O estado do Mato Grosso, maior produtor nacional, teve uma contribuição para esse recorde, apresentando uma produtividade média de 3.773 kg/ha. A região do MATOPIBA, que inclui os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, também apresentou resultados expressivos, com destaque para a Bahia, que alcançou a maior produtividade média do país (Kist *et al.*, 2023; CONAB, 2024).

A partir da primeira década do século XXI, a expansão da soja no Brasil tem sido caracterizada pela ocupação de novas fronteiras agrícolas, com destaque para a região do MATOPIBA. Durante esse período, a produção de soja na região aumentou de 681 mil toneladas em 2000 para 154,6 milhões de toneladas em 2023. O crescimento da área cultivada com soja no MATOPIBA é notável, com a safra de 2022/23 registrando uma área total de 5.335,7 mil hectares, representando um aumento expressivo em relação a anos anteriores. Além disso, a produção de soja na região cresceu 12,6% em comparação com a safra anterior, totalizando 19.985,5 mil toneladas, evidenciando a importância do MATOPIBA na produção nacional de grãos (Gazzoni & Dall'Agnol, 2018; Araújo *et al.*, 2019; Kist *et al.*, 2023; CONAB, 2024).

No entanto, a expansão do cultivo de soja, especialmente na região do MATOPIBA, tem provocado transformações nos ecossistemas naturais, como no bioma do Cerrado (savana), que em 2018 preservava apenas 54% de sua vegetação nativa (Santos & Cherem, 2023). O Cerrado, que originalmente cobria cerca de 23% do território brasileiro, é reconhecido como um dos *hotspots* de biodiversidade mundial (Myers *et al.*, 2000). Segundo Ratter e Ribeiro (1996), em algumas áreas do bioma, é possível encontrar até 120 espécies de árvores e arbustos por hectare. Diante da biodiversidade que o bioma apresenta, o planejamento estratégico para sua conservação é fundamental (Fearnside, 2001; Klink & Machado, 2005; Rocha, Majo & Silva, 2022).

Segundo o Relatório Anual do Desmatamento no Brasil de 2023, que analisa os alertas de desmatamento utilizando imagens de alta resolução do MapBiomas Alerta, o Cerrado ultrapassou a Amazônia em termos de área desmatada, alcançando a marca de 1.110.326 hectares. Sendo importante destacar que apenas 7,5% do Cerrado está sob proteção legal, tornando o bioma vulnerável à conversão, principalmente para atividades agropecuárias intensivas (Ratter, Ribeiro & Bridgewater, 1997; Rausch *et al.*, 2019; Mapbiomas, 2024). O desmatamento no Cerrado não só reduz a cobertura vegetal, mas também prejudica o clima da região. A remoção da vegetação nativa tem reduzido a evapotranspiração, elevado a temperatura da superfície terrestre, ocasionando a diminuição da precipitação regional (Spera *et al.*, 2016; Rodrigues *et al.*, 2022).

Apesar do sucesso econômico, a expansão da agricultura no Cerrado tem provocado impactos ambientais, como a erosão do solo, a degradação da vegetação nativa e a disseminação de gramíneas exóticas, que comprometem as funções ecológicas do bioma. O uso intensivo de produtos químicos, as mudanças no regime de fogo e as alterações nos ciclos do carbono e da

água são consequências dessa transformação intensiva da paisagem (Klink & Machado, 2005; Klink *et al.*, 2020).

Na região do MATOPIBA, em 2023, aproximadamente 47% de toda a perda de vegetação nativa do Brasil ocorreu nessa região, totalizando 858.952 hectares. Esse aumento, que representa um crescimento de 59% em relação a 2022, é reflexo da expansão da agricultura, especialmente no bioma Cerrado, e do aprimoramento dos sistemas de detecção de desmatamento. A conversão de áreas nativas em regiões de agricultura intensiva, predominantemente em formações savânicas, tem transformando a paisagem e comprometendo a sustentabilidade ambiental na região (Polizel *et al.*, 2021; Vieira *et al.*, 2021; Ferreira, 2023; Mapbiomas, 2024).

Além disso, a expansão da soja, a partir da década de 1990, teve um impacto na substituição de culturas tradicionais e de subsistência, como arroz, feijão, mandioca e milho, que eram cultivadas por agricultores familiares nativos dos municípios que fazem parte da região do MATOPIBA. Sendo agravada pela ausência de políticas públicas adequadas, como assistência técnica e zoneamento agroecológico, para garantir proteção as áreas dedicadas à agricultura tradicional (Altieri, 2009; Garrett, Lambin & Naylor, 2013; Lemos, 2015; Picoli *et al.*, 2020; Feitosa *et al.*, 2023).

Embora a transformação da paisagem no Cerrado ainda esteja presente, o fortalecimento das áreas protegidas e o cumprimento do Código Florestal Brasileiro são fundamentais para preservar a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos do Cerrado, como a segurança hídrica e o estoque de carbono. Assim como a implementação de políticas que promovam a redução do desmatamento a fim de reverter os impactos ambientais negativos e assegurar a resiliência do Cerrado diante das instabilidades climáticas (Lahsen, Bustamante & Dalla-Nora, 2016; Vieira *et al.*, 2017; Resende *et al.*, 2019; Brock *et al.*, 2021).

Diante do avanço da produção de soja na região do MATOPIBA, o estudo buscou responder o seguinte questionamento: O crescimento da produção de soja na região é resultado de ganhos de produtividade da terra, ou ocorreu predominantemente via expansão das áreas plantadas, seja pelo desmatamento de vegetação nativa ou pela substituição de lavouras alimentares? Nessa perspectiva, formula-se a hipótese de que o crescimento da soja no MATOPIBA, entre 1985 e 2022, foi pelo “efeito substituição”, isto é, a conversão de áreas de vegetação nativa e de culturas de subsistência em lavouras de soja, do que por ganhos tecnológicos de produtividade.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo geral analisar a dinâmica temporal do avanço do cultivo de soja sobre áreas de vegetação nativa e áreas anteriormente cultivadas

com lavouras alimentares tradicionais na região do MATOPIBA. Como objetivos específicos:

- a) decompor a evolução da renda bruta da soja nos efeitos área, produtividade e substituição;
- b) verificar se a evolução das áreas colhidas com soja no MATOPIBA, entre 1985 e 2022, se deu pela substituição das áreas que eram anteriormente cultivadas com lavouras de produção de arroz, feijão, mandioca e milho, bem como áreas de vegetação nativa.

O trabalho está estruturado da seguinte forma. Além desta seção introdutória, tem mais três seções. Na segunda seção se apresenta a metodologia utilizada na pesquisa. Na terceira são apresentados e discutidos os resultados para, finalmente, na quarta seção serem apresentadas as conclusões.

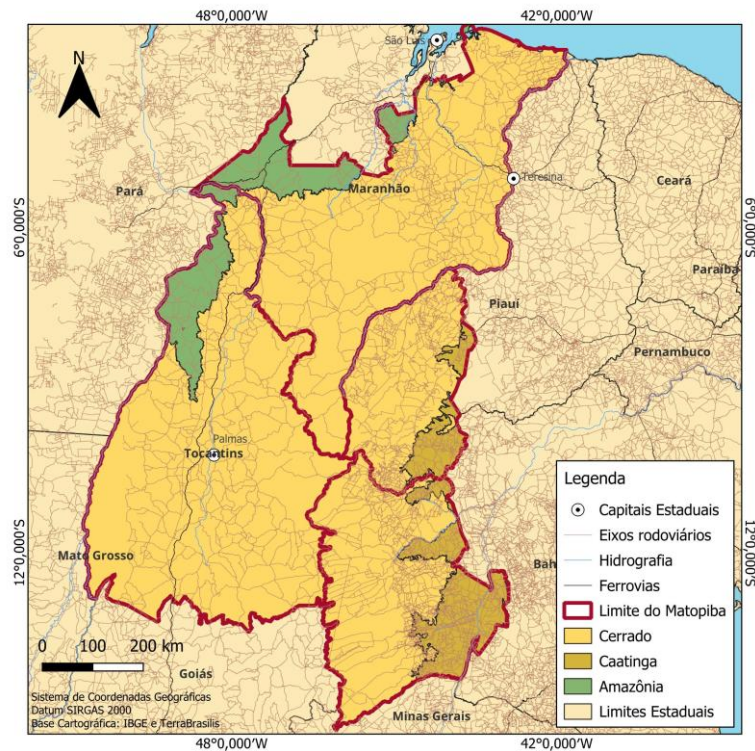
3.2 Materiais e métodos

Nesta seção estão descritas as características da região do MATOPIBA, a metodologia utilizada para aferir a substituição de áreas, envolvendo as etapas do modelo *shift-share*.

3.2.1 Área de estudo

A região do MATOPIBA apresenta uma extensão territorial de aproximadamente 73 milhões de hectares, distribuída por 337 municípios. Sua delimitação inclui 33% do estado do Maranhão (135 municípios), 38% do Tocantins (139 municípios), 11% do Piauí (13 municípios) e 18% da Bahia (30 municípios) (Figura 2) (Miranda; Magalhães; Carvalho, 2014). Esta área é predominantemente composta pelo bioma Cerrado, que representa 91% da região, o segundo maior bioma da América Latina e um dos *hotspots* mundiais, apresentando mais de 4.800 espécies, entre plantas e vertebrados. Além disso, a região do MATOPIBA também apresenta 7,3% da área do bioma da Amazônia e 1,7% do bioma da Caatinga (Strassburg *et al.*, 2017; Sano *et al.*, 2019; Durigan *et al.*, 2022; Araújo *et al.*, 2024).

Figura 2 - Mapa de localização geográfica da região do MATOPIBA



Fonte: Elaborado pela autora, segundo os dados do IBGE e EMBRAPA.

O clima da região do MATOPIBA pode ser subdividido em uma estação seca, de maio a setembro e uma estação chuvosa bem definida, de outubro a abril. Conforme a classificação de Köppen (1936), a região MATOPIBA possui clima tropical com inverno seco, verão quente, temperaturas médias acima de 25 °C e precipitação anual entre 1000 e 1900 mm. Influenciando diretamente as práticas agrícolas e o crescimento econômico da região (Alvares *et al.*, 2013; Ribeiro e Walter, 2008; Santos; Naval, 2022; Vieira *et al.*, 2021).

3.2.2 Metodologia utilizada para atingir os objetivos

Para alcançar o objetivo específico (a) e (b), foram utilizados dados secundários da Produção Agrícola Municipal (PAM), disponíveis no Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), bem como dados de vegetação nativa do Projeto MapBiomias, referentes ao período de 1985 a 2022, coletados para a análise da região do MATOPIBA. Os valores nominais observados foram anualmente ajustados para o ano de 2022, utilizando o IGP-DI da Fundação Getúlio Vargas como indexador. O período de análise abrange os anos de 1985 a 2022. A descrição das variáveis utilizadas neste estudo está apresentada no Quadro 4.

Quadro 4 - Definições das variáveis utilizadas na pesquisa.

Variável	Definição
----------	-----------

VPS_t	Valor da produção da soja, corrigido para 2022
PRS_t	Preço médio da soja (R\$.Kg ⁻¹), em valores de 2022
AVN_t	Áreas de vegetação nativa em hectares (ha)
ARS_t	Área colhida de soja em hectares (ha)
PDS_t	Produtividade da soja (kg.ha ⁻¹)
$AALY_{it}$	Áreas colhidas de arroz, feijão, mandioca e milho em hectares (ha)

Fonte: Elaborado pela autora.

Para estimar a área colhida, a produtividade, os preços da soja e o impacto da substituição da área de vegetação nativa e das áreas colhidas com lavouras de arroz, feijão, mandioca e milho pela soja na região do MATOPIBA, o estudo utilizou o modelo *shift-share*. Essa abordagem tradicional é determinística (não estocástica) (Creamer, 1943; Dunn, 1960; Ferreira *et al.*, 2009; Knudsen, Barff, 1991; Perloff, 1960).

O modelo *shift-share*, introduzido por Dunn em 1960, é uma técnica utilizada na análise regional para decompor mudanças econômicas e compreender o impacto de diferentes fatores, como o efeito de estrutura industrial e o efeito competitivo, no crescimento regional (Markusen, Noponen & Driessen, 1991; Trubnik & Mazurenko, 2019; Lv, Gao & Zhang, 2021).

Ao longo dos anos, o modelo passou por diversas modificações. Pesquisadores como Artige e van Neuss (2014) propuseram alterações, introduzindo o conceito de efeito competitivo dissociado da estrutura econômica regional e nacional, enquanto Loveridge e Selting (1998) dividiram a componente regional em estrutural e competitiva, refletindo, respectivamente, o crescimento devido à composição industrial e à competitividade da região. Além disso, adaptações realizadas por Hoppes (1991) e Knudsen e Barff (1991), incorporaram testes de hipóteses e ajustes metodológicos, visando aumentar a robustez do modelo.

A fim de aferir os mecanismos que contribuíram para a expansão agrícola, a metodologia utilizou o modelo *shift-share* para decompor o crescimento da produção da soja. Devido a sua capacidade de isolar e quantificar os diferentes componentes que determinam esse crescimento, permitindo diferenciar se os ganhos são resultantes de aumentos de produtividade, de variações de preços ou, principalmente, da substituição de áreas (de vegetação nativa ou de culturas alimentares tradicionais).

Buscando inspiração no estudo de Lemos (2015), que aplicou o modelo *shift-share* para avaliar a produção de alimentos no Maranhão e o impacto da expansão da soja sobre a

agricultura familiar, este trabalho busca adaptar essa metodologia para avaliar a dinâmica da região do MATOPIBA.

Para aferir os impactos de cada um dos componentes do valor bruto da produção de soja (VPS) na região do MATOPIBA, corrigido para 2022, parte-se da definição do valor da produção associada a uma determinada atividade agrícola, conforme apresentado na equação (1):

$$VPSt = PRSt \cdot PDS_t \cdot ARSt \quad (1)$$

Em que VPS_t é o valor corrigido da produção anual da cultura soja no ano “t”; $PRSt$ é o preço médio por kg da cultura de soja no t-ésimo ano, corrigido para 2022; PDS_t é a produtividade de soja observada para o ano “t”; e ARS_t é a área colhida de soja no ano “t”.

Multiplicando e dividindo a equação (1) pela área com vegetação nativa (AVN_t) e pela área com lavouras tradicionais (arroz, feijão, mandioca e milho) ($AALY_t$), onde o valor Y representa cada área de cultura tradicional para sua análise de forma desagregada, obtém-se o seguinte resultado:

$$VPSt = PDS_t \cdot PRSt \cdot \left(\frac{ARSt}{AVN_t \cdot AALY_t} \right) \cdot AVN_t \cdot AALY_t \quad (2)$$

Aplicando o logaritmo natural aos termos da equação (2) e fazendo a derivada total em relação ao tempo (T), chega-se ao seguinte resultado:

$$\log(VPSt) = \log(PRSt) + \log(PDS_t) + \log\left(\frac{ARSt}{AVN_t \cdot AALY_t}\right) + \log(AVN_t) + \log(AALY_t) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} d[\log(VPSt)] dT &= d[\log(PRSt)] dT + d[\log(PDS_t)] dT + \\ &+ d\left[\log\left(\frac{ARSt}{AVN_t \cdot AALY_t}\right)\right] dT + d[\log(AVN_t)] dT + d[\log(AALY_t)] dT \end{aligned} \quad (4)$$

A derivada do logaritmo de uma variável em relação ao tempo, por definição, é a sua taxa geométrica de crescimento instantânea (TGC) (Wooldridge, 2015). Em face da evolução da cultura do milho, que na região do MATOPIBA já é cultivada de forma intensiva nas unidades agrícolas patronais, procede-se ao desdobramento da evolução das áreas colhidas e se calculam as respectivas TGC, da seguinte forma:

$$\text{Log}(Y_{it}) = \beta_0 + \beta_{1i} + \epsilon_{it} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (5)$$

Em que Y_{it} tanto pode ser as áreas colhidas com arroz, feijão, mandioca e milho entre 1985 e 2022; T é o tempo. A derivada de $\text{Log}(Y_{it})$ em relação tempo (T) é β que, multiplicada por 100, é a TGC de Y_i . Assim a equação (2) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\text{TGC}_{\text{VPSt}} = \text{TGC}_{\text{PRSt}} + \text{TGC}_{\text{PDSt}} + \text{TGC}_{\frac{\text{ARSt}}{\text{AVNt.AALYt}}} + \text{TGC}_{\text{AVNt}} + \text{TGC}_{\text{AALYt}} \quad (6)$$

A equação (6), por construção, é uma relação determinística ou tautológica. Por conseguinte, a soma das parcelas que estão do seu lado direito será exatamente igual ao valor que está do lado esquerdo.

3.3 Resultados e discussão

Na Tabela 1 apresentam-se as estimativas encontradas na pesquisa para os coeficientes de regressão que, multiplicados por 100, geram as TGC instantâneas, como foi discutido na metodologia deste trabalho.

Tabela 1 - Taxas Geométricas de Crescimento (TGC), R^2 ajustado e significância para as variáveis do modelo *shift-share* na região do MATOPIBA (1985–2022).

	TGC (%)	R^2 Ajustado	Signif.
VPS_t	13,1%	0,653	0,000
PRS_t	0,98%	-0,013	0,479
PDS_t	2,67%	0,660	0,000
$\text{ARS}_t / (\text{AVN}_t \cdot \text{AAL}_t)$	13%	0,859	0,000
AVN_t	-0,8%	0,988	0,000
A_{arroz}	-4,22%	0,846	0,000
$A_{\text{feijão}}$	1,03%	0,312	0,000
A_{mandioca}	-2,16%	0,369	0,000
A_{milho}	2,56%	0,659	0,000

Fonte: Elaboração própria com base nos dados do IBGE e MapBiomass, 1985-2022.

Os resultados na Tabela 1 indicam um crescimento da produção de soja na região do MATOPIBA ao longo do período analisado, de 1985 a 2022. O valor da produção de soja (VPSt) apresentou uma Taxa Geométrica de Crescimento (TGC) de 13,1%, refletindo a expansão dessa cultura na região. O modelo de regressão utilizado explica 65,3% da variabilidade no valor da produção, como evidenciado pelo R^2 ajustado de 0,653,

estatisticamente significativa. O crescimento da produção de soja no MATOPIBA tem sido impulsionado por diversos fatores, com destaque para o aumento da área plantada e a melhoria da produtividade, resultantes do uso de tecnologias avançadas e da crescente demanda global por *commodities* agrícolas (Buainain & Garcia, 2016; Araújo *et al.*, 2019; Seixas *et al.*, 2020).

Outro fator importante é a conversão de áreas de vegetação nativa, como o Cerrado, em terras agrícolas, o que tem contribuído para a expansão da soja. Conforme Zalles *et al.* (2018) e Polizel *et al.* (2021) a conversão de pastagens de baixa produtividade e de áreas de vegetação nativa para o cultivo de soja é uma das principais causas desse crescimento. Além disso, a combinação de incentivos governamentais, investimentos em infraestrutura, têm intensificado a expansão da soja na região do MATOPIBA (Vera-Diaz, Kaufmann & Nepstad, 2009).

Por outro lado, o preço da soja (PRSt) apresentou R^2 ajustado negativo (-0,013) e a falta de significância estatística ($p = 0,479$) sugerem que o modelo não representa bem as variações nos preços, indicando que outros fatores, possivelmente externos ao modelo, influenciam o preço da soja. Esse resultado aponta para a volatilidade dos preços da soja é influenciada por uma série de fatores globais e locais, incluindo mudanças na demanda internacional, flutuações cambiais, variações climáticas em regiões produtoras e políticas comerciais que afetam o comércio de *commodities* agrícolas. (Geman & Nguyen, 2005; Richards, 2012; Peri, 2015).

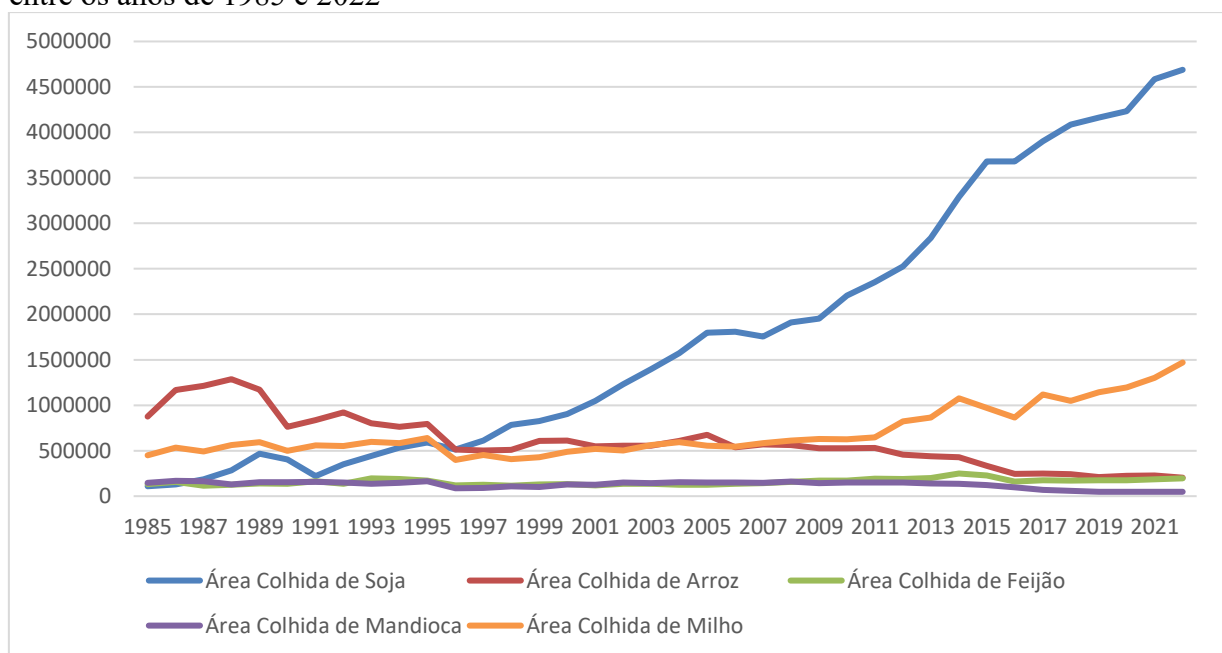
A produtividade da soja (PDSt) também apresentou um aumento ao longo do período, com uma TGC de 2,67% a.a. A introdução de tecnologias e práticas agrícolas mais eficientes tem sido fundamental para impulsionar o crescimento da produção de soja. A aplicação de fertilizantes, o manejo integrado de pragas e o melhoramento genético de sementes, com maior resistência a pragas e adaptação ao clima do Cerrado, tem sido importante na produtividade da soja no MATOPIBA (Borges & Nova, 2011; Matsuo *et al.*, 2012; Horvat, Watanabe & Yamaguchi, 2015; Ferneda *et al.*, 2016). Além disso, a mecanização moderna também tem contribuído para o aumento dos rendimentos. Tais avanços foram essenciais para atender à crescente demanda global por soja, ampliando a competitividade da produção regional (Rocha & Foschiera, 2018; Mantovani *et al.*, 2019; Sattolo *et al.*, 2021).

A análise da razão entre a área de soja e a soma das áreas de vegetação nativa e lavouras alimentares (ARSt / (AVNt. AALt)) revelou uma TGC de 13%, sugerindo um ritmo acelerado em que as áreas com a leguminosa avançam sobre essas áreas, validando uma das suposições norteadoras desta pesquisa. Com um R^2 ajustado de 0,859 e significativo, o modelo

sugere que a expansão da soja tem sido um dos principais fatores de mudança no uso da terra na região do MATOPIBA.

A intensificação agrícola no Cerrado, impulsionada principalmente pela expansão da soja, tem resultado na conversão de ecossistemas nativos em terras agrícolas, impactando a biodiversidade local, comprometendo os serviços ecossistêmicos essenciais, como o armazenamento de carbono, reduzido com a substituição de florestas e vegetações nativas por monoculturas de soja (Bonini *et al.*, 2018; Rausch *et al.*, 2019). Essa expansão, muitas vezes realizada em consórcio com outras culturas como o milho, também tem substituído áreas antes dedicadas ao cultivo de alimentos básicos, como arroz, feijão e mandioca, levando à perda da diversidade agrícola, como evidenciado no Gráfico 3 (Lemos, 2015; Lin & Henry, 2016; Ramos Junior *et al.*, 2019; Feitosa *et al.*, 2023).

Gráfico 3 - Trajetórias das áreas colhidas de soja e das culturas alimentares no MATOPIBA entre os anos de 1985 e 2022



Fonte: Elaborado pela autora, segundo os dados da PAM/IBGE.

Estudos realizados por Martinelli *et al.*, (2010) e Phalan *et al.* (2013) indicam que a substituição de culturas alimentares tradicionais por soja está relacionada às tendências globais de utilizar o solo na produção de commodities que são voltadas à exportação e crescimento econômico, resultando em um declínio contínuo de áreas destinadas a alimentos essenciais, como arroz e mandioca, principalmente como foi capturado nesta pesquisa.

Assim como as comunidades locais que dependem da agricultura diversificada para sua subsistência, a conversão de terras agrícolas diversificadas para monoculturas de soja

frequentemente leva à concentração de terras e ao deslocamento de pequenos agricultores, comprometendo seus meios de subsistência. Além disso, essa transição tem sido associada à migração de comunidades rurais para centros urbanos, agravando as desigualdades socioeconômicas nesses centros e aumentando a demanda por serviços como saneamento, saúde, moradia, ocupação, escolas para os filhos que, normalmente, já são deficientes nesses centros urbanos (Fearnside, 2001; Lemos, 2020).

A área de vegetação nativa (AVNt), ao contrário do que era esperado, apresentou uma leve diminuição, com uma TGC de -0,8%. Esse declínio é captado estatisticamente pelo modelo que teve um coeficiente de determinação ajustado (R^2) de 0,988, e a significância (probabilidade de erro menor do que 1%) confirma essa tendência. Essa evidência sugere que a expansão das áreas cultivadas com soja no MATOPIBA se deu basicamente pela substituição das áreas antes dedicadas às lavouras tradicionais. Isso fica evidente quando se observam as trajetórias das áreas colhidas com soja e com as lavouras de arroz, feijão e milho nessa região que estão mostradas no Gráfico 3.

Além disso, entre os anos de 1990 e 2017, a região do MATOPIBA apresentou redução de cerca de 8,4 milhões de hectares de vegetação nativa, enquanto as áreas agrícolas aumentaram em 4,3 milhões de hectares. Em relação às áreas protegidas, é importante destacar que o bioma da Amazônia possui cerca de 28,7% de área sob proteção, enquanto o Cerrado conta com apenas 7,5%, evidenciando a vulnerabilidade do bioma diante da expansão agrícola (Sparovek *et al.*, 2010; Polizel *et al.*, 2021).

Esse processo de transformação é observado em diversas áreas do Cerrado, onde a substituição da vegetação nativa por áreas agrícolas e de pastagem reduz a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos (Caballero *et al.*, 2023).

As áreas destinadas às culturas alimentares tradicionais, como arroz, feijão, mandioca e milho, apresentaram comportamentos variados na região do MATOPIBA. O arroz (A_{arroz}) mostrou uma significativa redução na área cultivada, com uma Taxa de Crescimento Geométrico (TGC) negativa de -4,22%, assim como a mandioca ($A_{mandioca}$), que teve uma TGC de -2,16%. Essa diminuição reflete a substituição gradual dessas culturas por culturas de tecnologias mais avançadas e, por isso, economicamente mais rentáveis, como a soja. Em contrapartida, o feijão ($A_{feijão}$) e o milho (A_{milho}) registraram TGCs positivas, de 1,03% e 2,56%, respectivamente. É importante destacar que o milho é frequentemente plantado em consórcio com a soja, uma prática agrícola que permite otimizar o uso do solo e aumentar a produtividade. Tal sistema promove o melhor aproveitamento de nutrientes e recursos hídricos, além de reduzir a incidência de pragas e doenças (Dolijanović *et al.*, 2013; Brito *et al.*, 2023).

A expansão da soja tem levado à substituição de cultivos alimentares tradicionais, como observado por Wesz Junior e Bueno (2008), que destacam o impacto dessa monocultura sobre pequenas propriedades familiares. O aumento da oferta de crédito e a maior demanda pelo cultivo de soja tem provocado a substituição dos cultivos tradicionais pela produção de soja em pequenas propriedades familiares. Essas, por sua vez, enfrentam desafios para se adaptar, uma vez que a concentração fundiária favorece as grandes propriedades e dificulta a competitividade dos pequenos agricultores (Wesz Junior & Bueno, 2008; Tramontina, Talamini & Ferreira, 2008).

Além disso, priorizar a produção da soja também levou a redução das áreas de subsistência, comprometendo a segurança alimentar local e a sustentabilidade das comunidades rurais, que ficaram vulneráveis às oscilações do mercado mundial (Wesz Junior & Bueno, 2008; Lemos, 2015).

3.4 Conclusões

Com base nesta análise temporal que apresentou o impacto da expansão da soja sobre as áreas de vegetação nativa e de culturas alimentares tradicionais no MATOPIBA, entre os anos de 1985 a 2022. Este trabalho mostrou que o crescimento da produção de soja foi impulsionado principalmente pelo aumento da área plantada e pela melhoria da produtividade, devido à importância de tecnologias e práticas agrícolas eficientes. No entanto, os dados também revelam uma conversão de áreas de vegetação nativa e a redução de áreas cultivadas com arroz e mandioca, envolvendo questões ambientais e socioeconômicas.

A substituição de culturas alimentares tradicionais por monoculturas de soja tem impacto negativo em relação à diversidade agrícola e a segurança alimentar das comunidades locais. A perda da vegetação nativa, especialmente no bioma Cerrado, compromete os desafios relacionados à preservação ambiental, prejudicando a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos essenciais, como a regulação do ciclo de carbono e a manutenção da qualidade do solo.

Diante desse cenário, é fundamental promover políticas públicas de uso da terra e a adoção práticas agrícolas sustentáveis, assim como a diversificação das culturas garantindo a sustentabilidade socioeconômica para os pequenos produtores, na busca de um equilíbrio no uso da terra na preservação das culturas alimentares tradicionais. E a sustentabilidade ambiental na preservação da biodiversidade do Cerrado, podendo assim reduzir os impactos negativos da

expansão do agronegócio e promovendo o desenvolvimento sustentável para a região do MATOPIBA.

4 MODELO HÍBRIDO DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS E DECOMPOSIÇÃO DE COMPONENTES PRINCIPAIS PARA PREVER AS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA REGIÃO BRASILEIRA DO MATOPIBA¹

RESUMO

As emissões de gases de efeito estufa (GEE) na produção agrícola representam um desafio ambiental global, sendo necessário compreender os fatores que as influenciam para desenvolver práticas sustentáveis. O objetivo geral desta pesquisa é investigar alguns dos fatores que provavelmente influenciam as emissões e reduções de GEE na produção agrícola na região de MATOPIBA, no Brasil, entre 2006 e 2017. Foi utilizada uma metodologia híbrida, e a primeira etapa utilizou modelos lineares (decomposição em componentes principais) e modelos não lineares (redes neurais artificiais) para determinar as relações que deveriam existir entre a variável dependente (emissões de GEE) e 11 variáveis orginais. Os dados foram obtidos do Censo Agropecuário Brasileiro de 2006 e 2017, MapBiomass, SEEG e NOAA. Os resultados mostram que apenas 100 dos 337 municípios reduziram emissões, influenciados principalmente por fatores de preservação e produtividade. Em contrapartida, o aumento das emissões esteve ligado à intensificação tecnológica e degradação (gado, máquinas e queimadas), reforçando a necessidade de políticas públicas para uma agricultura de baixo carbono.

Palavras-chave: agricultura brasileira; EMBRAPA; mudança no uso da terra; bioma Cerrado; evolução das emissões de GEE.

¹ Trabalho publicado na revista **Global Journal of HUMAN-SOCIAL SCIENCE: E Economics**, v. 25, n. 1, 2025. Qualis A1 em Ciências Ambientais e Economia
<https://socialscienceresearch.org/index.php/GJHSS/article/view/104316>

A HYBRID MODEL OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS AND PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS TO PREDICT GREENHOUSE GAS EMISSIONS IN THE BRAZILIAN MATOPIBA REGION

ABSTRACT

Greenhouse gas (GHG) emissions in agricultural production represent a global environmental challenge, necessitating an understanding of the influencing factors to develop sustainable practices. The primary objective of this research is to investigate factors likely influencing GHG emissions and reductions within agricultural production in the MATOPIBA region of Brazil between 2006 and 2017. A hybrid methodology was employed; the initial phase utilized linear models (Principal Component Decomposition) and non-linear models (Artificial Neural Networks) to determine the relationships between the dependent variable (GHG emissions) and 11 original variables. Data were acquired from the 2006 and 2017 Brazilian Agricultural Censuses, MapBiomas, SEEG, and NOAA. The results indicate that only 100 of the 337 municipalities experienced a reduction in emissions, primarily influenced by preservation and productivity factors. Conversely, the increase in emissions was linked to technological intensification and environmental degradation (cattle, machinery, and burn scars), underscoring the necessity for public policies promoting low-carbon agriculture.

Keywords: brazilian agriculture; EMBRAPA; change in land use; cerrado biome; evolution of GHG emissions.

4.1 Introdução

A agropecuária brasileira é mundialmente reconhecida por seu destaque no mercado global, principalmente na produção de grãos e alimentos como soja, milho, algodão e carnes (FAOSTAT, 2020). Nos últimos anos, a expansão do cultivo de soja no Brasil tem se intensificado, consolidando o país como um dos principais exportadores mundiais. Tal crescimento se deve ao avanço de novas fronteiras agrícolas como a região do MATOPIBA, que abrange os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, localizados predominantemente no bioma do Cerrado (Santos & Naval, 2022).

Desde a criação da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) em 1973, os conhecimentos gerados na instituição têm sido fundamentais na geração e na adaptação de tecnologias para as condições tropicais desse tipo de produção, principalmente no Cerrado. Isto impulsiona o desenvolvimento do setor agrário no país. Tais inovações consolidaram o Brasil como um dos maiores produtores e exportadores globais de alimentos (Nehring, 2016; Souza *et al.*, 2020; EMBRAPA, 2024).

No entanto, apesar do crescimento econômico impulsionado pelo setor agrícola, essa é uma das atividades responsáveis pelas emissões de gases do efeito estufa (GEE), devido à utilização de fertilizantes à base de combustíveis fósseis, à queima de biomassa, à elevada densidade de gado bovino por unidade de área e ao uso de máquinas agrícolas, que também utilizam esse tipo de combustível em sua matriz energética (Liu *et al.*, 2017). Segundo a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), o setor agrícola pode ser responsável por até 21% das emissões de GEE no mundo (FAO, 2016).

O aumento do efeito estufa pode ser potencializado pelos níveis crescentes de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera (Myhre *et al.*, 2013), o que é atribuído a várias causas. A produção agrícola pode contribuir para esse processo por meio das ações descritas no parágrafo anterior. No entanto, paradoxalmente, as plantas desempenham um papel crucial na redução dessas emissões por meio do fenômeno bioquímico conhecido como fotossíntese. Durante a fotossíntese, as plantas capturam CO₂, energia solar, água e nutrientes do solo, transformando-os em matéria orgânica e liberando oxigênio como subproduto. Devido a esse fenômeno, o CO₂ é frequentemente conhecido como o gás da vida. Portanto, pode-se inferir que o desmatamento pode ser uma das principais causas da redução da capacidade de captura de CO₂, que acaba sendo liberado por várias fontes (Felicio, 2014).

Assim, uma das principais fontes de emissões de CO₂ é a queima de combustíveis fósseis (Forster *et al.*, 2007). Além disso, as mudanças no uso da terra podem alterar o fluxo de

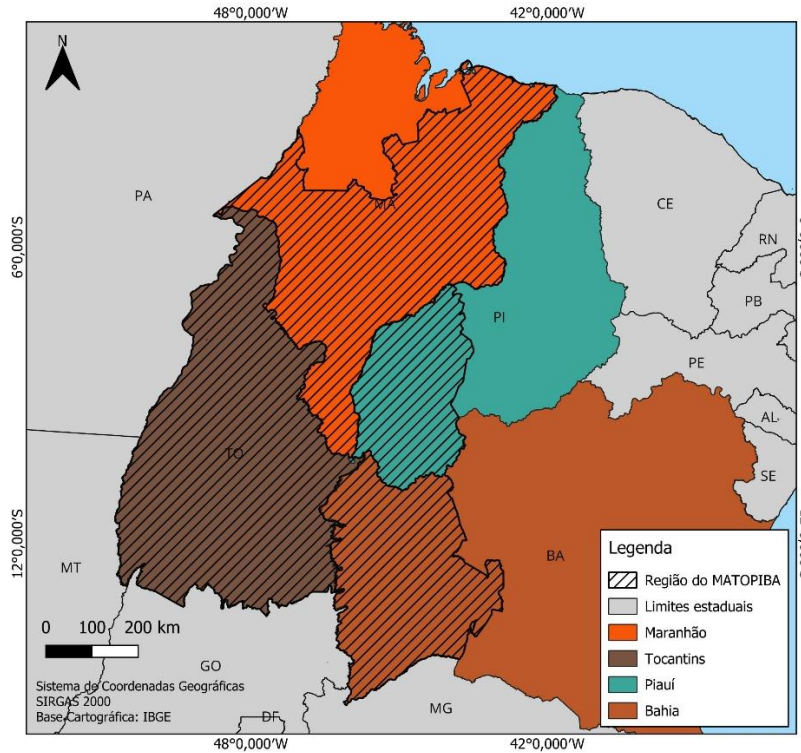
dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), gases de efeito estufa resultantes de modificações nos processos biogeoquímicos (Forster et al., 2007; Houghton *et al.*, 2012; Kirschbaum *et al.*, 2012; Kim & Kirschbaum, 2015).

Estima-se que, em todo o mundo, aproximadamente 420 milhões de hectares de floresta tenham sido desmatados desde 1990. Mais da metade (54%) das florestas mundiais estão concentradas em apenas cinco (5) países: Rússia, Brasil, Canadá, Estados Unidos e China. Enquanto isso, as áreas agrícolas expandiram-se em 6% entre 2000 e 2021, contribuindo para um crescimento de 38% nas culturas permanentes e de 12% nas culturas temporárias (FAO, 2020).

Em 2021, o Brasil tinha 66 milhões de hectares de terras aráveis, com um aumento de 20% nas áreas agrícolas devido à expansão das culturas temporárias (FAO, 2023). Portanto, é necessário avaliar com mais rigor como a terra é utilizada como principal fator de produção na agricultura e sua relação com as emissões de gases de efeito estufa, uma vez que está diretamente relacionada às mudanças nos estoques de carbono orgânico do solo. Isso, por sua vez, é importante para determinar a qualidade do solo, a fertilidade natural, a produtividade agrícola e a fixação do dióxido de carbono atmosférico (CO₂) (Kumar *et al.*, 2022). Além disso, o uso do fogo relacionado à mudança no uso da terra também pode reduzir os estoques de carbono orgânico do solo (Van der Werf *et al.*, 2006; Van der Werf *et al.*, 2010; Kim & Kirschbaum, 2015).

Nas últimas décadas, desde sua implementação na década de 1980, a fronteira agrícola MATOPIBA, que inclui partes dos estados do Maranhão (135 dos seus 217 municípios), Tocantins (todos os 139 municípios), Piauí (33 dos seus 224 municípios) e Bahia (30 dos seus 417 municípios na fronteira) (Figura 3), emergiu como uma das principais regiões para a expansão da produção de grãos, especialmente soja.

Figura 3 - Mapa de localização da região do MATOPIBA



Fonte: Elaboração própria.

De acordo com dados da Produção Agrícola Municipal (PAM) do IBGE, em 2023 os 337 municípios da MATOPIBA registraram um aumento de 9,6% na área cultivada em relação ao ano anterior. Conseqüentemente, a produção atingiu 18.943.144 toneladas, um aumento de 11,2%, com um rendimento médio de 3.581,94 kg/ha, representando um crescimento de 1,44% em relação a 2022.

Além disso, entre 2013 e 2017, o PIB da agricultura na MATOPIBA atingiu R\$ 17,1 bilhões, com uma taxa média de crescimento anual de 7,7% (Souza, Magalhães & Castro, 2022). No entanto, esse crescimento econômico também teve impactos ambientais. Entre 2010 e 2013, a região do MATOPIBA foi responsável por 45% das emissões de carbono florestal resultantes da expansão agrícola no Cerrado, com o Maranhão dando uma das principais contribuições (14,42%) (Noojipady *et al.*, 2017).

A conversão de áreas nativas do Cerrado em terras agrícolas intensifica o desmatamento (Rausch *et al.*, 2019). Em 2023, de acordo com o Relatório Anual sobre Desmatamento no Brasil, a região do MATOPIBA foi responsável por quase metade (47%) da perda de vegetação nativa no Brasil, com 858.952 hectares desmatados, representando um aumento de 59% em relação ao ano anterior. Dos 50 municípios com maior desmatamento no país, 33 estão no Cerrado, e os 10 com as principais áreas desmatadas estão neste bioma. O estado do Maranhão liderou o ranking nacional, com 331.225 hectares desmatados, um aumento

de 95,1%. O estado do Tocantins registrou um aumento de 177,9% no desmatamento, com 230.253 hectares desmatados, enquanto a Bahia desmatou 290.606 hectares, representando um aumento de 27,5% em relação a 2022 (RAD, 2023).

Essa mudança no uso da terra, resultante da conversão de áreas nativas em terras agrícolas e pastagens, impulsiona o desmatamento e promove o uso frequente do fogo (Reddington *et al.*, 2015; Spera *et al.*, 2016). De acordo com dados do MapBiomias Fogo, entre 1985 e 2023, cerca de 199,1 milhões de hectares foram queimados no Brasil, dos quais 44,6% (equivalente a 88,5 milhões de hectares) estavam no bioma Cerrado, enquanto o bioma Amazônia representou 19,6% (MapBiomias, 2023).

Embora o fogo seja um elemento natural utilizado para limpar áreas onde serão plantadas culturas ou pastagens, ele está se tornando uma ameaça devido à sua frequência crescente e à possibilidade de ficar fora de controle no Cerrado devido à expansão agrícola e ao desmatamento. O Cerrado é responsável por 48% da produção de soja do país e aproximadamente um quarto dessa área produtiva está localizada na região MATOPIBA (Pitta *et al.*, 2017; Soterroni *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2021; MapBiomias, 2023).

Diante desse cenário, estudar a evolução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e identificar os fatores que provavelmente contribuem para a redução ou expansão dessas emissões na região da MATOPIBA é essencial para orientar políticas públicas e investimentos que promovam uma agricultura com emissões de GEE reduzidas ou nulas (Bezerra, 2022).

Com base no exposto, esta pesquisa tem como objetivo responder às seguintes perguntas: 1 - Quantos municípios da MATOPIBA tiveram aumento ou diminuição nas emissões de GEE entre 2006 e 2017? 2 - Quais variáveis, e em que proporções, provavelmente influenciaram essas emissões nesse intervalo de tempo?

Para responder a essas perguntas, o objetivo geral deste estudo é investigar os fatores que influenciam as emissões e reduções de GEE na produção agrícola na região do MATOPIBA entre 2006 e 2017. Especificamente, o estudo busca: a - Verificar o número de municípios na região do MATOPIBA e, por estado, identificar quais tiveram aumento ou diminuição nas emissões de GEE entre 2006 e 2017; b - Analisar a interação entre as variáveis testadas na determinação das emissões de GEE nesse período; c - Avaliar como as emissões de GEE são influenciadas pelas sinergias entre os indicadores analisados.

A estrutura do trabalho está organizada da seguinte forma: além desta introdução, há mais três seções. A segunda seção descreve a metodologia empregada na pesquisa. A terceira seção apresenta e discute os resultados. Na quarta e última seção, são apresentadas as conclusões do estudo.

4.2 Materiais e métodos

4.2.1 Base de dados e construção dos indicadores

A pesquisa utiliza dados secundários extraídos dos Censos Agrícolas de 2006 e 2017, MapBiomass, NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) e SEEG (Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa), dos quais foram obtidas informações sobre as variáveis que supostamente afetam as emissões de gases de efeito estufa nos municípios da região MATOPIBA ao longo desses 11 anos. As variáveis e fontes de dados utilizadas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Variáveis que, por hipótese, afetam positivamente (+) ou negativamente (-) as emissões de gases de efeito estufa (GEE) entre 2006 e 2017 na região de MATOPIBA nesta pesquisa *Continua*

Variáveis	Hipótese da relação entre Y_i e X_{ij}	Definição	Fontes
Y_i	Emissões de GEE	Emissões (GEE_{2017}/GEE_{2006})	Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa - SEEG (2022).
X_{i1}	(-)	(Precipitação média anual municipal 2017) / (Precipitação média anual municipal 2006)	NOAA (2022)
X_{i2}	(-)	(Cobertura vegetal) [(Áreas de cultivo + áreas florestais) / (área total de estabelecimento 2017)] / [(Áreas de cultivo + áreas florestais) / (área total de estabelecimento 2006)]	Censo Agropecuário de 2006 e 2017 / IBGE
X_{i3}	(-)	[(Valor da produção agrícola 2017) / (Área agrícola colhida 2017)] / [(Valor da produção agrícola 2006) / (Área agrícola colhida 2006)]	Censo Agropecuário de 2006 e 2017 / IBGE

Tabela 2 - Variáveis que, por hipótese, afetam positivamente (+) ou negativamente (-) as emissões de gases de efeito estufa (GEE) entre 2006 e 2017 na região de MATOPIBA nesta pesquisa

			<i>Conclusão</i>
X _{i4}	(-)	$[(\text{Valor da produção pecuária 2017}) / (\text{Área de pastagem 2017})] / [(\text{Valor da produção pecuária 2006}) / (\text{Área de pastagem 2006})]$	Censo Agropecuário de 2006 e 2017 / IBGE
X _{i5}	(-)	$[(\text{Áreas recuperadas 2017}) / (\text{Áreas desmatadas 2017})] / [(\text{Áreas recuperadas 2006}) / (\text{Áreas desmatadas 2006})]$	MapBiomas
X _{i6}	(+)	$[(\text{Quantidade de bovinos 2017}) / (\text{áreas de pastagem 2017})] / [(\text{Quantidade de bovinos 2006}) / (\text{áreas de pastagem 2006})]$	Censo Agropecuário de 2006 e 2017 / IBGE
X _{i7}	(+)	$[(\text{Total de tratores e máquinas 2017}) / (\text{área total do estabelecimento 2017})] / [(\text{Total de tratores e máquinas 2006}) / (\text{área total do estabelecimento 2006})]$	Censo Agropecuário de 2006 e 2017 / IBGE
X _{i8}	(+)	$[(\text{Despesa com defensivos agrícolas 2017}) / (\text{área total dos estabelecimentos municipais 2017})] / [(\text{Despesa com defensivos agrícolas 2006}) / (\text{área total dos estabelecimentos municipais 2006})]$	Censo Agropecuário de 2006 e 2017 / IBGE
X _{i9}	(+)	$[(\text{PIB do setor industrial 2017}) / (\text{PIB municipal total 2017})] / [(\text{PIB do setor industrial 2006}) / (\text{PIB municipal total 2006})]$	Censo Agropecuário de 2006 e 2017 / IBGE
X _{i10}	(+)	CV da Precipitação 2017/ CV da Precipitação 2006	NOAA (2022)
X _{i11}	(+)	$(\text{Áreas com cicatrizes de fogo 2017}) / (\text{Áreas com cicatrizes de fogo 2006})$	MapBiomas

Fonte: Compilação com base em dados do SEEG, MapBiomas, Censo Agrícola (2006 e 2017), IBGE e NOAA (2022).

As abordagens metodológicas adotadas para atingir os objetivos desta pesquisa começam com o desenvolvimento dos indicadores utilizados. Para avaliar as mudanças nas

emissões de gases de efeito estufa (GEE) entre 2006 e 2017, além do impacto das variáveis apresentadas na Tabela 2 sobre essas emissões, os indicadores são construídos da seguinte forma: estima-se a relação entre os valores observados em 2017 (ano final) e aqueles em 2006 (ano inicial) tanto para as emissões de GEE quanto para as variáveis explicativas.

Isso permite identificar se cada variável aumentou ou diminuiu ao longo do período analisado. Nos municípios em que a relação entre GEE_{2017} e GEE_{2006} é maior que 1, houve um aumento nas emissões; se for menor que 1, houve uma redução. O mesmo processo é aplicado às variáveis explicativas ou independentes (Tabela 2).

4.2.2 Metodologia adotada para avaliar o primeiro objetivo da pesquisa

Para atingir o primeiro objetivo da pesquisa, estimamos o número total de municípios onde as relações das emissões de GEE em 2017 foram superiores às observadas em 2006. Nesses casos, as relações são representadas como Y_{i2017}/Y_{i2006} . Além disso, medimos as relações entre as variáveis que se acredita terem influenciado as emissões de GEE entre 2006 e 2017, denotadas como X_{ij2017}/X_{ij2006} .

4.2.3 Metodologia para alcançar o segundo objetivo

Para estimar a sinergia entre as variáveis que se acredita terem influenciado as emissões de GEE, foi utilizada a Análise Fatorial (AF), utilizando a técnica de decomposição de componentes principais.

Antes de utilizar o modelo de decomposição de componentes principais, decidiu-se transformar todas as variáveis em índices. Os índices variam de 1 a 100. No caso da variável dependente, a relação entre as emissões de GEE entre 2006 e 2017, foi adotado o seguinte procedimento. Os municípios foram classificados em ordem decrescente pela relação entre as emissões de GEE entre 2006 e 2017. Portanto, quanto maior for o valor dessa relação, maiores as emissões de GEE entre 2006 e 2017. Por esse motivo, o valor mais alto de emissões recebeu o índice = 100. Os outros valores foram ajustados proporcionalmente usando uma regra simples e direta de três. Assim, no município onde o índice de emissões de GEE = 100, houve a maior emissão desse gás entre 2006 e 2017. Nos municípios onde o índice de GEE está próximo de 1, isso significa que houve a maior redução nessas emissões.

Em relação às 11 variáveis independentes utilizadas para causar emissões de GEE, foram adotados os seguintes critérios. Todas as 5 variáveis cuja hipótese neste estudo estabelece

que devem causar uma redução nas emissões de GEE entre 2006 e 2017 ($GEE_{2017/2006} \leq 1$) foram classificadas em ordem crescente. Ao valor mais baixo (pior caso) é atribuído um índice de 100. Os valores restantes são ajustados proporcionalmente usando uma regra inversa simples de três. Essas variáveis são marcadas com um sinal (-) na Tabela 1, indicando que, por hipótese, causam uma redução nas emissões de GEE.

As outras 6 variáveis independentes que, por hipótese, deveriam causar um aumento nas emissões de GEE ($GEE_{2017/2006}$) foram classificadas em ordem decrescente. O valor mais alto dessas variáveis (pior caso) recebeu um índice de 100. Os outros valores são ajustados proporcionalmente usando uma regra simples e direta de três. Essas variáveis são marcadas com um sinal (+) na Tabela 1, indicando que, por hipótese, causam um aumento nas emissões de GEE.

4.2.3.1 *Resumo do modelo de análise fatorial no que se aplica ao estudo*

A seguir, é apresentado um resumo do método de análise fatorial aplicado neste estudo. Em geral, o modelo de análise fatorial pode ser expresso da seguinte forma:

$$X = af + e; \tag{1}$$

Na equação (1), $X = (X_1, X_2, \dots, X_p)^T$ é um vetor transposto de variáveis observáveis, enquanto $f = (f_1, f_2, \dots, f_r)^T$ representa um vetor transposto que consiste em r fatores latentes ($r < p$) que não são diretamente observáveis. A matriz a de coeficientes tem dimensão ($p \times r$) de coeficientes fixos, conhecidos como cargas fatoriais; $e = (e_1, e_2, \dots, e_r)^T$ é um vetor transposto de termos aleatórios. Geralmente, presume-se que $E(e) = E(f) = 0$.

No início, as cargas fatoriais estimadas podem não ser definitivas; no entanto, o método de análise fatorial permite a rotação dessa estrutura inicial para uma melhor interpretação. Neste estudo, foi utilizada a rotação ortogonal varimax, que tem a vantagem de tornar os fatores independentes (Dillon & Goldstein, 1984; Johnson & Wichern, 1988; Basilevsky, 1994; Fávero et al., 2017).

Para construir o índice, as pontuações dos fatores são estimadas após a rotação ortogonal da estrutura inicial. A pontuação do fator posiciona cada observação no espaço dos fatores comuns. Assim, para cada fator f_i , a i -ésima pontuação do fator que pode ser extraída é definida por F_i e pode ser expressa como:

$$F_i = b_1 X_{i1} + b_2 X_{i2} + \dots + b_p X_{ip}; i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, p \quad (2)$$

Onde b_1, b_2, \dots, b_p são coeficientes de regressão; $X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ip}$ são “p” variáveis observáveis.

Embora F_i não seja diretamente observável, pode ser estimado usando técnicas de análise fatorial existentes, usando a matriz de variáveis observáveis X . Assim, a equação (2) pode ser reescrita de forma mais compacta usando notação matricial:

$$F_{(n \times q)} = X_{(n \times p)} \cdot B_{(p \times q)} \quad (3)$$

Nas equações (2) e (3), as pontuações dos fatores são influenciadas pela magnitude e pelas unidades das variáveis X . Para evitar esse problema, as variáveis X são normalizadas, resultando em:

$$Z_{ij} = [(X_i - m_{xi}) / s_{xi}]; \quad (4)$$

Onde m_{xi} é a média de X_i e s_{xi} é o seu desvio padrão. Assim, a equação (4) pode ser modificada para:

$$F_{(n \times q)} = Z_{(n \times p)} \cdot b_{(p \times q)} \quad (5)$$

Na equação (5), o vetor “b” substitui “B”, uma vez que as variáveis já estão normalizadas. Multiplicando previamente ambos os lados da equação por $(1/n)Z^T$, onde n é o número de observações e Z^T é a matriz transposta de Z , se obtém:

$$(1/n)Z^T F = (1/n)Z^T Z b. \quad (6)$$

A expressão $(1/n)Z^T Z$ corresponde à matriz de correlação das variáveis X , denominada R . A matriz $(1/n)Z^T F$ representa a correlação entre os escores dos fatores e os próprios fatores, denominada L . A equação é redefinida como:

$$L = R \cdot b \quad (7)$$

Se R for uma matriz não singular, verificada pelo teste de Bartlett, a análise pode prosseguir. Assim, a hipótese de que a matriz de correlações entre as variáveis não é uma matriz identidade deve ser rejeitada, com um nível de erro de pelo menos 5% (Fávero, 2017).

Se R for não singular, multiplique ambos os lados da equação (7) pela matriz inversa de R (R^{-1}), resultando em:

$$b = R^{-1}.L . \quad (8)$$

Para que o modelo estimado seja estatisticamente válido, é essencial realizar o teste de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), que deve produzir um valor superior a 0,5. Além disso, a variância total explicada pelos fatores ortogonais deve exceder 50% (Hair et al., 2005; Maroco, 2003; Fávero, 2017).

Após determinar o vetor “b” (conforme mostrado na equação 8), as composições de cada fator estimado são identificadas com base nas magnitudes das cargas fatoriais. Os fatores, que são uma redução das variáveis originais ($k < n$), podem ser redefinidos e renomeados conforme as magnitudes das cargas fatoriais que cada variável apresenta em cada fator componente.

O processo de decomposição em componentes principais permite a geração de escores fatoriais. Esses escores fatoriais, representados por FE, são variáveis normalizadas com média zero e desvio padrão um. Valores positivos e negativos gravitam em torno dessa média zero FE. Esses escores fatoriais podem ser convertidos em índices parciais associados a cada município (I_i) usando a equação (9). Esses índices parciais podem ser complementados, dependendo das variáveis agrupadas na composição de cada escore fatorial que o gerou.

$$I_i = (FE_i - FE_{MN}) / (FE_{MX} - FE_{MN}) \quad (9)$$

Na equação (9), FE_i é a pontuação normalizada do fator i , FE_{MN} é o valor mínimo da pontuação do fator e FE_{MX} é o valor máximo. Dessa forma, os índices I_i variam entre zero e um e serão utilizados neste estudo para identificar os resultados esperados para o segundo objetivo.

A relação entre as emissões de GEE e os índices parciais ($I_1; I_2, \dots, I_p$) pode ser descrita pela seguinte equação:

$$GEE_i = f(I_1; I_2, \dots, I_p) \quad (10)$$

Esta equação resume como os índices derivados das pontuações dos fatores explicam a variação nas emissões de GEE nos diferentes municípios.

4.2.4 Metodologia adotada para atingir o terceiro objetivo

Para atingir o terceiro objetivo desta pesquisa, utilizou-se o modelo de Redes Neurais Artificiais (RNA) para investigar como as emissões de GEE são influenciadas pela sinergia dos índices parciais (I_1, I_2, \dots, I_p). As RNAs fazem parte da inteligência artificial computacional. Uma das principais áreas de aplicação das RNA é a previsão de dados estatísticos multivariados que são não lineares e não paramétricos (Sharda & Patil, 1992; Lee et al., 2017).

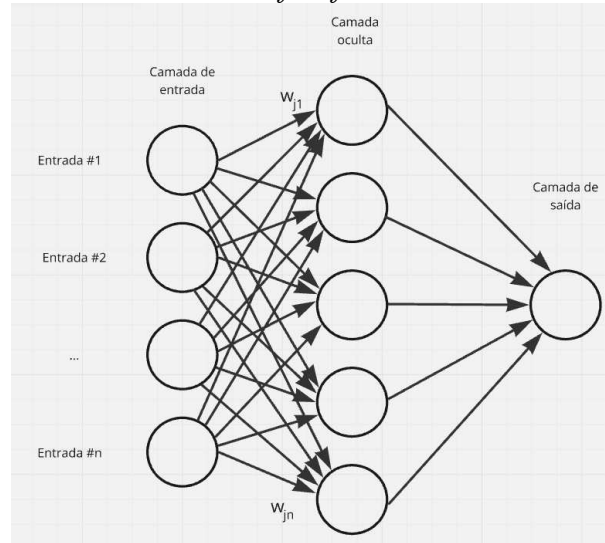
Zhang *et al* (1998) relatam que um dos procedimentos da inteligência artificial computacional normalmente utilizado para prever séries temporais é o treinamento de RNAs, com base na arquitetura e no aprendizado do cérebro humano. Dessa forma, segundo Zhang *et al* (1998), as RNAs funcionam como o cérebro humano, buscando reconhecer regularidades e padrões nos dados, sendo capazes de aprender com a experiência e fazer generalizações com base no conhecimento acumulado anteriormente. As RNAs são modelos não lineares, ao contrário dos modelos de previsão tradicionais, como Box & Jenkins (1976) e Pankratz (1983), que assumem que as séries estudadas são geradas por processos lineares.

Ao projetar um modelo RNA, podemos imaginá-lo como uma rede de “neurônios” artificiais organizados em camadas. As variáveis utilizadas para prever (entradas) uma variável dependente (saída) formam a camada inferior, enquanto as variáveis previstas formam a camada superior. O modelo RNA também permite a possibilidade de camadas intermediárias, geralmente conhecidas como camadas ocultas (Sharda & Patil, 1992).

Projetadas para representar como o cérebro humano processa informações, as RNAs são algoritmos de computador que adicionam conhecimento ao detectar padrões e correlações e podem ser treinadas por meio da experiência. Elas consistem em centenas de neurônios artificiais (ou nós) interconectados em camadas hierárquicas. Cada neurônio tem uma função de saída específica e a conexão entre cada dois nós tem um peso, constituindo sua memória de rede neural artificial. É por meio desses pesos que o poder dos cálculos neurais se reflete, ou seja, o grau de influência que uma célula exerce sobre outra.

Construído para simular a função biológica de um neurônio, cada nó tem entradas ponderadas, uma função de transferência e uma saída. As redes neurais *feedforward* transmitem informações linearmente, da camada de entrada para a camada de saída, e estão entre os tipos mais populares usados em várias aplicações (Figura 4) (Agatonović-Kuštrin; Beresford, 2000; Miranda, Jaramillo & Peñuela, 2021).

Figura 4 - Rede neural artificial *feedforward* com uma camada oculta



Fonte: Elaborado com base Gómez, Fernández & Peñuela (2021).

Nesta pesquisa, o processo começa com a entrada de dados, em que as variáveis explicativas correspondem aos índices parciais gerados pela análise fatorial, e a variável dependente é representada pelas emissões de GEE (Y_i). Os dados foram divididos aleatoriamente em dois conjuntos: 70% foram usados para treinar o modelo e 30% foram reservados para o conjunto de testes (Liu & Cocea, 2017; Dao et al., 2020). A saída de um neurônio pode ser escrita matematicamente:

$$Y_i = f(n) \quad (11)$$

Onde n é a soma ponderada dos sinais de entrada mais um termo de ajuste (viés), definido como:

$$n = \sum_{j=1}^p (w_j \cdot X_j) + b \quad (12)$$

Onde $X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ip}$ são os sinais de entrada do neurônio (índices parciais gerados

pela análise fatorial); w_1, w_2, \dots, w_p são os pesos associados a cada entrada, determinando a importância de cada sinal no processo; “b” é o termo de viés, usado para ajustar a flexibilidade do modelo; e $f(*)$ é a função de ativação, responsável pela não linearidade do modelo, permitindo que a rede aprenda relações complexas entre os dados.

O desempenho do modelo foi avaliado usando métricas quantitativas, incluindo o Erro Quadrático Médio (RMSE), o Erro Absoluto Médio (MAE) e o Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE). Quanto menores forem os valores estimados para essas medidas, melhores os ajustes. O RMSE é calculado pela diferença quadrática média entre os valores previstos e observados, mostrada na Equação 13. Ele fornece uma visão geral da precisão do modelo. Quanto menor o RMSE, mais preciso é o modelo. O Erro Absoluto Médio (MAE), medido pela equação (14), também é uma métrica usada para avaliar modelos. Por fim, o Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE), medido pela equação (15), expressa os erros como uma porcentagem, facilitando a interpretação dos valores observados (Pham et al., 2018; Elsaraiti, 2024). O uso de várias métricas é vantajoso para obter uma visão mais ampla do desempenho do modelo a partir de diferentes perspectivas (Tripathy & Prusty, 2021).

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_{\text{observed}} - v_{\text{predicted}})^2} \quad (13)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |v_{\text{observed}} - v_{\text{predicted}}| \quad (14)$$

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{v_{\text{observed}} - v_{\text{predicted}}}{v_{\text{predicted}}} \right| * 100 \quad (15)$$

4.3 Resultados e discussão

Para aumentar a clareza da apresentação e discussão dos resultados, eles foram organizados segundo a linha do tempo dos objetivos da pesquisa.

4.3.1 Resultados encontrados para o primeiro objetivo

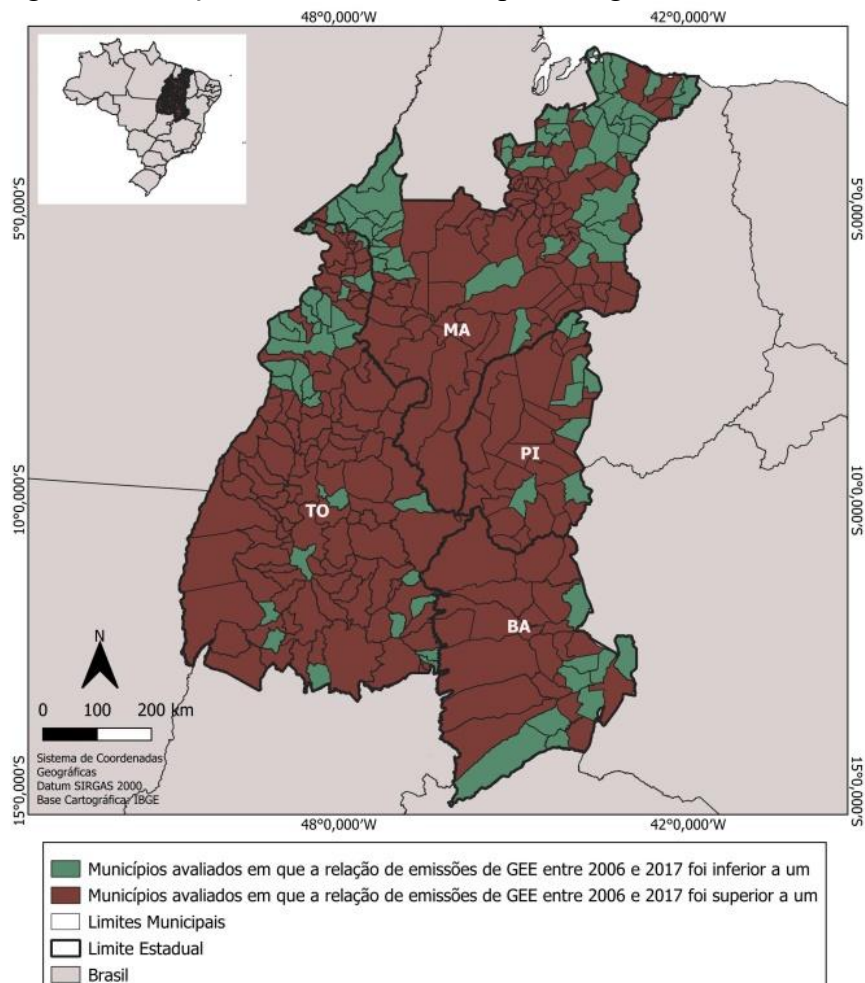
A Tabela 3 e a Figura 5 mostram as frequências absolutas e relativas dos municípios da MATOPIBA para os estados que apresentaram aumento ou diminuição nas emissões de GEE entre 2006 e 2017.

Tabela 3 - Frequências absolutas e relativas das emissões de GEE nos municípios da MATOPIBA de 2006 a 2017.

Estados	Frequências absolutas de municípios onde a razão de emissões de GEE entre 2017 e 2006 foi inferior a 1 (GEE < 1)	Frequência relativa (%)	Frequências absolutas de municípios onde a razão de emissões de GEE entre 2017 e 2006 foi maior que 1 (GEE >1)	Frequência relativa (%)
Maranhão	50	37	85	63
Tocantins	33	23,7	106	76,3
Piauí	8	24,2	25	75,8
Bahia	9	30	21	70
Total	100	100	237	100

Fonte: Resultados encontrados na pesquisa.

Figura 5 - Relação de GEE 2017/2006 para a região de MATOPIBA



Fonte: Resultados encontrados na pesquisa.

Houve predominância de municípios com aumento nas emissões de GEE durante o período analisado. Dos 337 municípios da região do MATOPIBA, 237 (aproximadamente 70,3%) apresentaram aumento nas emissões, enquanto 100 (29,7%) relataram redução. Entre os municípios do estado do Maranhão, 50 de um total de 135 (37%) tiveram redução nas emissões, enquanto 85 (63%) apresentaram aumento. Em Tocantins, dos 139 municípios, 33 (23,7%) registraram diminuição nas emissões, enquanto 106 (76,3%) apresentaram aumento. No Piauí, dos 33 municípios, apenas 8 (24,2%) reduziram as emissões, enquanto 25 (75,8%) apresentaram um aumento. No estado da Bahia, de um total de 30 municípios da MATOPIBA, 9 (30%) reduziram as emissões, enquanto 21 (70%) apresentaram um aumento (Tabela 3).

4.3.2 Resultados obtidos para o segundo objetivo

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos a partir do procedimento de decomposição em componentes principais da análise fatorial (AF) realizada nesta pesquisa.

Tabela 4 - Resultados encontrados mostrando a decomposição das 11 variáveis originais em 3 componentes principais *Continua*

Variáveis		Matriz de componentes rotacionados			Matriz dos Coeficientes dos Escores dos Componentes		
		1	2	3	1	2	3
Índice de precipitação	X _{i1}	0.000	0.009	1.000	-0.001	-0.003	0.500
Índice de cobertura vegetal	X _{i2}	-0.296	0.856	-0.006	0.036	0.281	-0.008
Índice de valor da produção agrícola	X _{i3}	-0.225	0.896	0.013	0.061	0.306	0.001
Índice de valor relativo da pecuária	X _{i4}	-0.035	0.788	0.008	0.098	0.291	-0.001
Índice de áreas recuperadas relativas	X _{i5}	-0.264	0.941	0.009	0.056	0.317	-0.001
Índice de quantidade relativa de bovinos	X _{i6}	0.927	-0.260	-0.009	0.219	0.029	-0.004
Índice de maquinário relativo	X _{i7}	0.947	-0.170	-0.024	0.237	0.066	-0.013
Índice de despesa relativa com pesticidas	X _{i8}	0.865	-0.258	0.013	0.202	0.021	0.007

Tabela 4 - Resultados encontrados mostrando a decomposição das 11 variáveis originais em 3 componentes principais

							<i>Conclusão</i>
Índice do PIB industrial relativo	X _{i9}	0.927	-0.083	-0.001	0.243	0.096	-0.002
Índice de precipitação relativa_cv	X _{i10}	0.000	0.009	1.000	-0.001	-0.003	0.500
Índice de áreas queimadas relativas	X _{i11}	0.937	-0.199	0.020	0.230	0.053	0.010
Medida de Adequação da Amostragem de Kaiser-Meyer-Olkin:							0,738
Teste de Esfericidade de Bartlett							
Qui-quadrado aproximado							8186,7
							27
Graus de liberdade							55
Nível de significância							0,000
Variância Total Explicada (%)							88,232
Variância explicada pelo componente 1 (%)							40,464
Variância explicada pelo componente 2 (%)							29,575
Variância explicada pelo componente 3 (%)							18,193

Fontes: Resultados encontrados na pesquisa.

Observações: Método de extração: Análise de Componentes Principais; Método de rotação: *Varimax* com Normalização de Kaiser. Pontuações dos componentes. A rotação convergiu em 4 iterações.

As evidências apresentadas na Tabela 4 indicam que o ajuste obtido usando o método de decomposição de componentes principais (DCP) foi estatisticamente significativo. O teste *de Bartlett*, que apresentou um alto nível de significância ($p = 0,00$), demonstrou que a matriz de correlação das variáveis independentes não é uma matriz identidade. A estatística estimada para o teste de Adequação da Amostragem de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) foi de 0,738, e a variância total explicada pelo modelo ajustado foi de aproximadamente 88,232%. As variações explicadas por cada componente estimado após a rotação ortogonal *Varimax* foram 40,464%, 29,575% e 18,193%, respectivamente, para os componentes 1, 2 e 3. Esses resultados indicam que a maior sinergia capturada pelo procedimento DCP foi no componente 1, que mede as razões entre: o número de bovinos por hectare; o número de tratores e máquinas; os gastos com pesticidas; e o PIB industrial em relação ao PIB total dos municípios; e a evolução das cicatrizes de fogo no período estudado. Todas essas variáveis capturadas neste componente, conforme assumido nesta pesquisa, devem ter afetado positivamente as emissões de gases de efeito estufa entre 2006 e 2017. Essa sinergia, como vimos, é responsável por explicar 40,464% da capacidade explicativa total do modelo gerado (Tabela 4).

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4, também é possível observar que, associadas ao segundo componente gerado na pesquisa, cuja variância explica aproximadamente 29,575% da variância total explicada, estão quatro das cinco variáveis que supostamente causam uma redução nas emissões de gases de efeito estufa: o índice de cobertura vegetal; o índice que mede o potencial produtivo das culturas; o índice que mede a capacidade produtiva da pecuária e o índice que mede a recuperação de áreas degradadas.

Para o terceiro componente, as maiores sinergias ocorreram entre as variáveis índice de precipitação, que supostamente reduz as emissões de GEE, e o índice que mede a instabilidade da precipitação, conforme medido pelos coeficientes de variação, que supostamente aumenta as emissões de GEE. Essas duas variáveis são responsáveis por 18,193% da variância total explicada. Com base nesses resultados, foi gerada a matriz, composta por três pontuações de fatores que capturam essas sinergias (Tabela 4).

4.3.3 Resultados obtidos para o terceiro objetivo

Conforme mostrado acima, o terceiro objetivo desta pesquisa buscou avaliar como as emissões de GEE são influenciadas pelas sinergias entre os indicadores analisados. Para isso, os índices de emissões de GEE entre 2006 e 2017 foram transformados em índices. Na etapa anterior, ao utilizar a AF, assumiu-se que as relações entre as variáveis eram lineares. Assim, os três escores fatoriais estimados são linearmente independentes. Nesta etapa, presume-se que a relação entre o índice de emissões de GEE entre 2006 e 2017 e as variáveis independentes transformadas em escores fatoriais é não linear. O modelo de Redes Neurais Artificiais (RNA) é utilizado para realizar o teste. Os resultados são apresentados na Tabela 5 e na Figura 6.

Tabela 5 - Resultados da estimativa utilizando RNA, com o índice de emissões de GEE como variável dependente e os índices FS1, FS2 e FS3 como variáveis independentes *Continua*

Emissões de GEE _{2017/2006} ≤ 1		Emissões de GEE _{2017/2006} > 1	
Erro relativo no período de treinamento (%)	1.011	Erro relativo no período de treinamento (%)	1.002
Erro relativo no período de teste (%)	0.908	Erro relativo no período de teste (%)	0.997
Número de unidades na camada oculta, incluindo 1 camada oculta de polarização	3	Número de unidades na camada oculta, incluindo 1 camada oculta de polarização	4
Importância da Variável Independente		Importância da Variável Independente	

Tabela 5 - Resultados da estimativa utilizando RNA, com o índice de emissões de GEE como variável dependente e os índices FS1, FS2 e FS3 como variáveis independentes *Conclusão*

Variáveis	Importância (pesos)	Variáveis	Importância (pesos)
FS1	0.276	FS1	0.486
FS2	0.496	FS2	0.391
FS3	0.228	FS3	0.123
Teste de Acurácia		Teste de Acurácia	
RMSE	3.12	RMSE	10.49
MAE	2.52	MAE	6.58
MAPE	13.11	MAPE	21.29

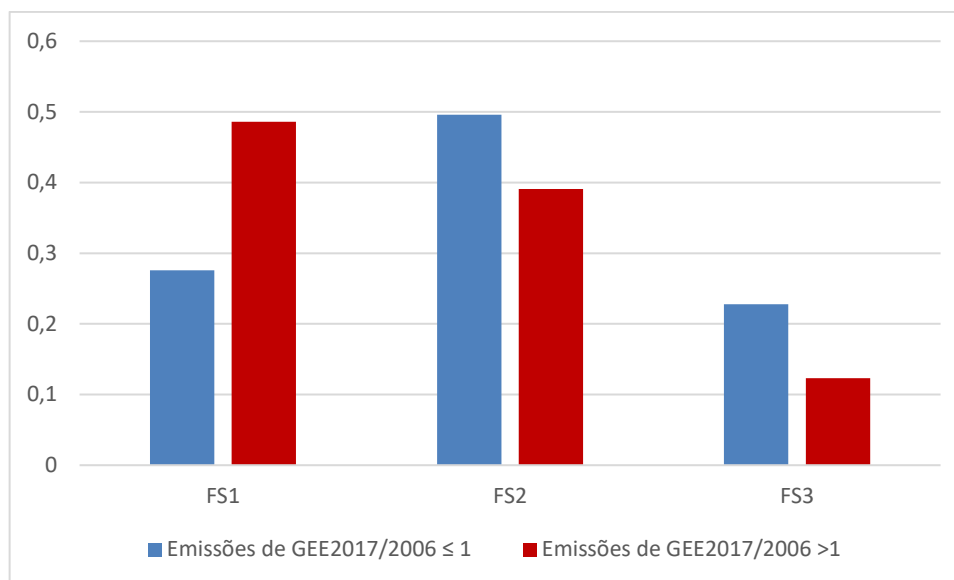
Fonte: Resultados encontrados na pesquisa

Os resultados apresentados na Tabela 5 e na Figura 6 mostram que, nos 100 municípios onde houve redução nas emissões de GEE entre 2006 e 2017, a pontuação do fator que reúne as quatro variáveis (FS2) que hipoteticamente impactam essa redução teve o maior peso (0,496), seguida pela pontuação do FS1, que reúne as variáveis que, por hipótese, contribuíram para o aumento das emissões de GEE entre 2006 e 2017, com peso de 0,276. Enquanto isso, o FS3, que reúne as variáveis associadas à precipitação e instabilidade, teve peso de 0,228.

Entre as seis variáveis transformadas em índices, que foram hipoteticamente associadas ao aumento das emissões de GEE entre 2006 e 2017, cinco foram agrupadas no fator de pontuação 1 (FS1), com peso estimado de 0,486. O fator de pontuação 2 (FS2) teve peso de 0,391 nessa definição, enquanto o fator de pontuação 3 (FS3) teve peso de 0,123 (ver Tabela 5 e Figura 6).

Esses resultados comprovam as hipóteses desta pesquisa, indicando que as variáveis que supostamente causariam uma redução e um aumento nas emissões de GEE entre 2006 e 2017 em MATOPIBA. Também pode-se observar que os erros de previsão nas fases de treinamento e teste foram bastante baixos. Além disso, os testes RMSE, MAE e MAPE também apresentaram valores muito baixos, confirmando assim a precisão dos ajustes.

Figura 6 - Importância relativa da pontuação de cada fator nos municípios da MATOPIBA com emissões de GEE \leq e emissões de GEE $>$ 1



Fontes: Resultados encontrados na pesquisa.

Conforme mostrado nas evidências apresentadas na Tabela 5, para estimar os pesos associados a cada uma das variáveis independentes (explicativas) no grupo de 100 municípios da MATOPIBA onde a relação de GEE ≤ 1 , o modelo RNA utilizou 3 unidades na camada oculta, incluindo 1 viés da camada oculta. Para estimar a importância das variáveis explicativas nos municípios onde a relação GEE > 1 , o modelo utilizou 4 unidades na camada oculta, incluindo 1 viés da camada oculta.

Nos municípios onde as emissões de GEE são menores ou iguais a 1, o peso mais alto foi estimado para a variável FS2 (0,496), seguida pela FS1 (0,276), e o peso mais baixo foi associado à variável independente FS3 (0,228). Esses resultados destacam a importância de todas as variáveis originais sintetizadas na FS2, pois se espera que elas contribuam para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Portanto, a hipótese da pesquisa é confirmada.

Sobre os pesos estimados para as variáveis construídas linearmente para os municípios em que os índices de GEE > 1 , pode-se observar que, como esperado, o maior peso foi atribuído à combinação FS1 (0,486), que reúne sinergicamente praticamente todas as variáveis originais que, nesta pesquisa, se presume terem contribuído para o aumento das emissões de gases de efeito estufa entre 2006 e 2017. Pode-se observar que os índices pluviométricos, assim como os índices de instabilidade pluviométrica medidos pelos coeficientes de variação, contribuíram tanto para a redução quanto para o aumento das emissões de GEE.

4.4 Conclusão

A partir dos resultados das evidências extraídas da pesquisa, verificou-se que, dos 337 municípios que compõem a região agrícola de fronteira MATOPIBA, 100 apresentaram redução nas emissões de GEE entre 2006 e 2017, período em que esta pesquisa foi realizada. Nos demais 237 municípios, as emissões de GEE aumentaram no mesmo período.

Foram testadas cinco (5) variáveis que supostamente levaram a uma redução nas emissões de GEE no período investigado e seis variáveis que supostamente levaram a um aumento nas emissões. Os procedimentos metodológicos utilizados nesta pesquisa são inéditos neste tipo de estudo, na medida em que utilizam dois modelos em sequência. Este estudo empregou um modelo que avalia relações lineares por meio de análise fatorial utilizando a técnica de decomposição em componentes principais. Nesse processo, as 11 variáveis observadas foram reduzidas a três variáveis não observadas, chamadas de escores fatoriais. Esses escores fatoriais são ortogonais e linearmente independentes.

Na segunda etapa metodológica, foram estimadas as relações entre a variável dependente que mede as emissões de GEE entre 2006 e 2017 e os três escores fatoriais nos quais as 11 variáveis independentes originais foram sintetizadas por sinergia. Nesta etapa, assumiu-se que as relações eram não lineares. Portanto, as redes neurais artificiais (RNA) foram empregadas para avaliar os pesos que cada um dos três escores fatoriais contribui para explicar a variável dependente.

Observou-se que as hipóteses formuladas para esta pesquisa foram confirmadas. Das cinco variáveis que, segundo a hipótese, contribuíam para a redução das emissões de GEE, quatro foram agrupadas em um dos escores fatoriais e tiveram maior peso na explicação das emissões de gases de efeito estufa nos municípios da região de MATOPIBA que apresentaram queda nas emissões de GEE entre 2006 e 2017.

Por outro lado, das 6 variáveis testadas e que se supôs terem levado a um aumento nas emissões de gases de efeito estufa entre os dois períodos, 5 foram reunidas em sinergia em outra pontuação de fator (variável não observada gerada pelo procedimento linear) e tiveram maior peso nos municípios que tiveram um aumento nas emissões de GEE entre 2006 e 2017.

Assim, os resultados desta pesquisa podem indicar os caminhos que devem ser seguidos nas práticas agrícolas nesta fronteira agrícola. Além disso, podem orientar estudos futuros, identificando quais variáveis podem contribuir para a emissão ou redução das emissões de GEE.

A conclusão geral desta pesquisa é que ambas as questões que motivaram sua

execução foram respondidas e os objetivos propostos foram alcançados. Foram identificados os municípios da região do MATOPIBA que aumentaram e diminuíram as emissões de GEE entre 2006 e 2017, juntamente com as variáveis e suas respectivas ponderações que influenciaram essas mudanças nas emissões.

5 VULNERABILIDADES INDUZIDAS NA REGIÃO DO MATOPIBA

RESUMO

A região do MATOPIBA, caracterizada como a última fronteira agrícola do Brasil, passou por uma expansão no cultivo da soja da soja nas últimas décadas. Esse aumento tem impulsionado o crescimento econômico da região. O objetivo geral desta pesquisa foi analisar as vulnerabilidades socioeconômicas dos municípios da região MATOPIBA, identificando e quantificando as principais carências relacionadas ao desenvolvimento social e econômico local. De forma especificamente, buscou-se a) avaliar as vulnerabilidades relacionadas ao acesso à renda, educação e saneamento básico; b) mensurar, por meio do Índice de Vulnerabilidade Induzida (IVI_MATOPIBA), as carências identificadas nesses municípios. Para tanto, adaptou-se a metodologia de Lemos (2020) aos 337 municípios do MATOPIBA, utilizando o método de análise fatorial com a técnica de decomposição em componentes principais para ponderação dos indicadores de vulnerabilidade educacional, de renda, de acesso à água, de saneamento básico e de coleta de lixo, por meio de dados secundários do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Os resultados mostraram que o IVI_MATOPIBA foi de 45,37%, com distribuição heterogênea entre os estados: Maranhão apresentou o índice mais elevado (52,31%), seguido por Piauí (46,36%), Bahia (46,63%) e Tocantins (38,12%). as vulnerabilidades de saneamento básico (73,96%) e educação (53,93%) constituem as principais dificuldades da região. Organizados em quintis, os municípios que fazem parte da região evidenciaram que 86,6% dos municípios classificados com vulnerabilidade muito alta se concentram no Maranhão. Conclui-se que as vulnerabilidades induzidas confirmam que a modernização agrícola não produziu desenvolvimento socioeconômico inclusivo, sendo necessárias ações que envolvam desenvolvimento econômico com equidade social e proteção ambiental nas áreas mais vulneráveis.

Palavras-chave: fronteira agrícola; crescimento econômico; componentes principais; desenvolvimento econômico.

INDUCED VULNERABILITIES IN THE MATOPIBA REGION

ABSTRACT

The MATOPIBA region, characterized as Brazil's last agricultural frontier, has undergone an expansion in soybean cultivation in recent decades. This increase has driven economic growth in the region. The overall objective of this research was to analyze the socioeconomic vulnerabilities of municipalities in the MATOPIBA region, identifying and quantifying the main deficiencies related to local social and economic development. Specifically, we sought to a) assess vulnerabilities related to access to income, education, and basic sanitation; b) measure, using the induced vulnerability index (IVI), the deficiencies identified in these municipalities. To this end, the methodology of Lemos (2020) was adapted to the 337 municipalities of MATOPIBA, using the factor analysis method with the principal component decomposition technique to weight the indicators of educational vulnerability, income, access to water, basic sanitation, and waste collection, using secondary data from the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE). The results showed that the measured IVI was 45.37%, with heterogeneous distribution among the states: Maranhão had the highest index (52.31%), followed by Piauí (46.36%), Bahia (46.63%), and Tocantins (38.12%). The vulnerabilities of basic sanitation (73.96%) and education (53.93%) constitute the main difficulties in the region. Organized into quintiles, the municipalities that are part of the region showed that 86.6% of the municipalities classified as very vulnerable are concentrated in Maranhão. It can be concluded that the induced vulnerabilities confirm that agricultural modernization has not produced inclusive socioeconomic development, requiring actions that involve economic development with social equity and environmental protection in the most vulnerable areas.

Keywords: agricultural frontier; economic growth; principal components; economic development.

5.1 Introdução

A expansão da soja no MATOPIBA, última fronteira agrícola do Brasil, ancorada no bioma Cerrado, redefiniu dinâmicas socioeconômicas devido ao avanço de monocultivos mecanizados. Tal modelo, que está associado à concentração fundiária e à financeirização de terras (Sauer & Oliveira, 2021; Hershaw & Sauer, 2023), intensificou conflitos territoriais com povos tradicionais (Melo *et al.*, 2024) (Bolaños, 2011) e degradação ambiental (perda de 15-30% de carbono orgânico do solo) (Locatelli *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2023). Enquanto o PIB regional apresenta crescimento (Araújo *et al.*, 2019), pequenos produtores são marginalizados e a resiliência ecológica é reduzida, evidenciando divergências entre desenvolvimento agroeconômico e equidade socioambiental (Sauer, 2018; Polizel *et al.*, 2021).

A região apresentou uma área plantada de 57.494 hectares em 1985, saltando para 5.019.536 hectares em 2021, integralizando uma variação média anual de 13,2% nesse lapso de tempo (Moraes *et al.*, 2024). Essa expansão, ocasionada pelas inovações técnicas, transformou a paisagem. Estudos realizados por Moura Neto *et al.* (2022) e Araújo *et al.* (2024) indicam a redução de 27% na vegetação nativa do Cerrado entre 2000 e 2020, associada a mudanças nos padrões de evapotranspiração e aumento de temperaturas locais.

A monocultura mecanizada gerou ganhos de produtividade, porém consolidou um modelo de agronegócio dependente de insumos externos e intensivo no uso de tecnologias poupadoras de mão de obra (Pereira, Porcionato & Castro, 2018; Batista *et al.*, 2023). Essa modernização contribuiu para o incremento do desemprego entre trabalhadores rurais, especialmente aqueles que antes eram pequenos produtores. Como consequência, houve um impulso para o êxodo rural, sendo a saída da população das áreas rurais impulsionada pela busca de sobrevivência, melhores condições de vida e emprego em outros setores, regiões ou para as áreas urbanas (D'Angelis Filho & Dayrell, 2006; Serigati *et al.*, 2017; Lemos, 2020; Santos *et al.*, 2023).

Essa reestruturação do espaço rural alterou o perfil socioeconômico regional (Favareto *et al.*, 2019; Batista *et al.*, 2023), estabelecendo a promoção da concentração fundiária, intensificada pelo avanço das atividades agrícolas mais rentáveis de um ponto de vista econômico e pela aquisição de terras por grandes empresas e agricultores de outras regiões, dificultando a permanência de pequenos produtores, como ficou demonstrado no capítulo anterior desta pesquisa (Favareto *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2023).

A agricultura modernizada levou à substituição de práticas tradicionais e do uso múltiplo dos recursos naturais por monocultivos de larga escala, impactando as comunidades

locais, modificando seu modo de vida, tendo impactos no ambiente em decorrência da mudança de uso do solo como ficou demonstrado no capítulo anterior deste estudo (D'Angelis Filho & Dayrell, 2006; Santos *et al.*, 2023).

Tal processo de cultivo, ao liberar mão de obra do setor rural, contribuiu para um fluxo populacional que migrou para áreas urbanas, muitas vezes ocupando de forma irregular áreas e aumentando o mercado informal de serviços, o que acentua a vulnerabilidade social e econômica de parte dessa população deslocada (Alves, 2020; Santos *et al.*, 2023).

Municípios da região do MATOPIBA que registram alta produção agropecuária, como Balsas (MA) deveriam apresentar maior receita tributária via soja. Contudo os investimentos em saúde e educação permanecem insuficientes, ampliando disparidades urbano-rurais, devido à isenção de certos impostos voltados aos produtos de exportação (Lei Kandir) (Favareto *et al.*, 2019; Nunes & Campelo Filho, 2023; Silva Júnior & Arakawa, 2024).

Indicadores de saúde e educação fazem parte da dimensão social da sustentabilidade municipal, que, em média, é considerada mais frágil na região (Oliveira *et al.*, 2023). Este modelo de desenvolvimento focado em *commodities* para cadeias globais tende a concentrar a riqueza e seus efeitos positivos em poucos centros produtivos, resultando em desigualdades espaciais e impactos limitados no desenvolvimento amplo do capital humano local (Nunes & Campelo Filho, 2023).

Estudos realizados por Porcionato *et al.* (2018) e Nunes *et al.* (2023) revelam que, embora os incentivos da expansão agrícola tenham elevado o PIB regional, seus efeitos sobre o desenvolvimento humano são heterogêneos e frequentemente excludentes. Evidenciando que a modernização agrícola nem sempre se traduz em inclusão social, reproduzindo padrões históricos de desigualdade (Reis & Pertile, 2019).

O desafio reside em alinhar crescimento econômico com inclusão produtiva, garantindo direitos territoriais e acesso universal aos serviços básicos nas regiões de expansão agrícola. Superar essa lógica exige repensar indicadores de desenvolvimento além do PIB, incorporando dimensões ambientais e de justiça distributiva (Oliveira *et al.*, 2023) (Reis & Pertile, 2019).

Além disso, os agricultores familiares brasileiros, bem como os da região do MATOPIBA, que frequentemente cultivam produtos básicos como arroz, feijão e mandioca para subsistência e mercados locais, enfrentam acesso limitado e desigual ao crédito rural (apenas 15% dos agricultores familiares do Brasil acessam crédito), assistência técnica, tecnologia e infraestrutura adequada (Silva *et al.*, 2016; Souza & Albuquerque, 2023). Essa assimetria no acesso aos recursos e apoio acaba reforçando a posição dos agricultores familiares

apenas para o cultivo da subsistência, tornando-os distantes das linhas de comércio do agronegócio dominante (Silva *et al.*, 2016; Favareto *et al.*, 2019).

O objetivo geral deste artigo é analisar as vulnerabilidades socioeconômicas dos 337 municípios situados na região MATOPIBA, identificando e quantificando as principais carências relacionadas ao desenvolvimento social e econômico local. Especificamente, a pesquisa apresenta: a) avaliar as vulnerabilidades relacionadas ao acesso à renda, educação e saneamento básico; b) mensurar, por meio do Índice de Vulnerabilidade Induzida (IVI_MATOPIBA), as carências identificadas nesses municípios.

A pesquisa está organizada em quatro seções. Além desta introdução, a segunda seção descreve a metodologia empregada, com ênfase na construção do índice. Na terceira seção, são expostos e debatidos os resultados obtidos. Por fim, a quarta seção apresenta as conclusões do estudo.

5.2 Materiais e métodos

Este estudo propõe a adaptação da metodologia de estimação do Índice de Vulnerabilidade Induzida (IVI), originalmente desenvolvida e aplicada ao semiárido brasileiro por Lemos (2020), para uma análise específica da região do MATOPIBA. Esta região, que abrange os 337 municípios dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, tem se destacado por uma dinâmica agropecuária e por transformações socioeconômicas nas últimas décadas.

O IVI, conforme concebido por Lemos (2020), visa mensurar, de forma adimensional e proporcional, as vulnerabilidades induzidas que não derivam de fenômenos naturais, que podem ser atribuídas a privações no acesso à renda, à educação e a serviços ambientais básicos, potencialmente resultantes de omissões ou equívocos em políticas públicas. A adaptação desta metodologia permitiu um diagnóstico similar para o MATOPIBA, oferecendo uma ferramenta analítica para compreender as vulnerabilidades em um contexto de expansão da fronteira agrícola.

5.2.1 Definição dos indicadores de vulnerabilidade e coleta de dados para o matopiba

A construção do IVI_MATOPIBA se baseia em dados secundários, extraídos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para informações sobre Produto Interno Bruto (PIB), dados demográficos e domiciliares (Censo Demográfico 2022), o Ministério da

Economia para valores do Salário Mínimo Nacional, e a Receita Federal do Brasil para dados sobre a legislação do Imposto de Renda Pessoa Física (IRPF).

Os indicadores de vulnerabilidade, adaptados de Lemos (2020), são definidos da seguinte forma para a região do MATOPIBA:

- a) vulnerabilidade de educação (VULEDUC_MATOPIBA): indica a porcentagem da população do município com 25 anos ou mais que informaram não ter finalizado o ensino fundamental, conforme dados do Censo Demográfico de 2022. O ensino fundamental obrigatório, com duração de 9 (nove) anos, conforme estabelecido pela Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (BRASIL, 2018). Este indicador é relevante, pois, sob a ótica da Teoria do Capital Humano (Schultz, 1962; Becker, 1964), baixos níveis de escolaridade da população adulta comprometem a produtividade, limitam as oportunidades de inserção qualificada no mercado de trabalho e, por conseguinte, afetam negativamente a capacidade de geração de renda. No contexto do MATOPIBA, onde o setor agrícola tem se modernizado e demandado mão de obra com maior qualificação, a persistência de uma elevada VULEDUC_MATOPIBA pode significar a exclusão de uma parcela expressiva da população local dos empregos de melhor remuneração, contribuindo para a perpetuação ou aprofundamento das desigualdades socioeconômicas;
- b) vulnerabilidade de renda (VULREND_MATOPIBA): a construção das variáveis de vulnerabilidade de renda seguiu uma metodologia de normalização baseada em regras de três simples. Inicialmente, o **Índice PIB Domiciliar per Capita (IPIB_{dompc})** foi calculado utilizando como referência a renda anual mínima para declaração do Imposto de Renda Pessoa Física (R\$ 28.559,70), estabelecendo uma relação proporcional onde este valor corresponde ao índice 100, permitindo assim a transformação de valores absolutos de PIB domiciliar per capita em um índice relativo padronizado através da fórmula: $IPIB_{dompc} = (PIB \text{ domiciliar per capita} \times 100) / 28.559,70$. Em seguida, a **VULREND_MATOPIBA** foi construída a partir de uma regra de três inversa, onde o valor mínimo observado do IPIB_{dompc} (19,97) representa o máximo de vulnerabilidade (100%), estabelecendo uma relação inversamente proporcional expressa pela fórmula $VULREND_MATOPIBA\% = (19,97 \times 100) / IPIB_{dompc}$. Esta metodologia permite que municípios com menor índice PIB domiciliar per capita apresentem maior percentual de vulnerabilidade de renda, criando uma escala padronizada entre 0% e

- 100% que facilita a identificação de diferentes níveis de vulnerabilidade socioeconômica e possibilitando análises comparativas entre os municípios;
- c) vulnerabilidade de acesso à água encanada (VULAGUA_MATOPIBA): mensura o percentual da população do município que reside em domicílios que não possuem acesso à rede geral de abastecimento de água com pelo menos uma torneira no domicílio;
 - d) vulnerabilidade de saneamento (VULSANE_MATOPIBA): refere-se ao percentual da população do município que reside em domicílios sem acesso a esgotamento sanitário por rede coletora ou, ao menos, por fossa séptica ligada à rede coletora ou com fossa rudimentar;
 - e) vulnerabilidade de coleta de lixo (VULLIXO_MATOPIBA): mede o percentual da população do município que reside em domicílios onde o lixo não é coletado por serviço de limpeza, seja de forma direta ou indireta.

Conforme destacado por Lemos (2020), todos os indicadores utilizados são de natureza dicotômica, com categorias exaustivas e mutuamente exclusivas. A metodologia original evita o uso de medidas de tendência central na construção do IVI, como valores esperados, para prevenir distorções que poderiam ser causadas por valores extremos ou por distribuições de dados muito heterogêneas.

5.2.2 Estimação dos pesos dos indicadores via análise fatorial por componentes principais

Para a determinação dos pesos de cada indicador na composição do IVI_MATOPIBA e do seu componente ambiental (VULAMBI_MATOPIBA), adota-se a Análise Fatorial com decomposição em componentes principais. Esta abordagem permite que a ponderação de cada indicador seja definida, com base na estrutura de variância observada nos próprios dados dos municípios do MATOPIBA. Assim, os pesos refletem a importância relativa de cada tipo de privação na configuração da vulnerabilidade latente específica da região estudada.

As equações para o cálculo do Índice de Vulnerabilidade Induzida para o MATOPIBA (IVI_MATOPIBA) e do Índice de Vulnerabilidade Ambiental para o MATOPIBA (VULAMBI_MATOPIBA) são adaptadas das equações 1 e 2 de Lemos (2020):

O IVI_MATOPIBA foi calculado por:

$$\text{IVI_MATOPIBA} = P_1\text{VULEDUC_MATOPIBA} + P_2\text{VULREND_MATOPIBA} + P_3\text{VULAMBI_MATOPIBA} \quad (1)$$

onde P_1 , P_2 , e P_3 são os pesos para os indicadores de vulnerabilidade de educação, renda e o índice de vulnerabilidade ambiental (VULAMBI_MATOPIBA), respectivamente, também derivados da decomposição em componentes principais.

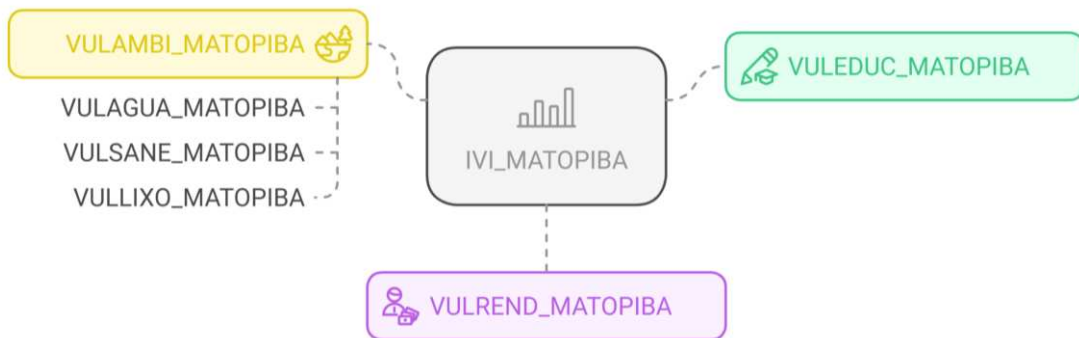
O VULAMBI_MATOPIBA foi calculado com a equação a seguir:

$$\text{VULAMBI_MATOPIBA} = P_4\text{VULAGUA_MATOPIBA} + P_5\text{VULSANE_MATOPIBA} + P_6\text{VULLIXO_MATOPIBA} \quad (2)$$

onde P_4 , P_5 , e P_6 são os pesos para os indicadores de vulnerabilidade de acesso à água, saneamento e coleta de lixo, respectivamente, da decomposição em componentes principais.

Em ambas as equações, os pesos (P) são valores positivos contidos no intervalo entre zero e um, e a soma dos pesos para cada índice (VULAMBI_MATOPIBA e IVI_MATOPIBA) é igual a um. Na Figura 7 tem-se a estrutura de organização da construção do IVI_MATOPIBA.

Figura 7 – Organograma da construção do IVI_MATOPIBA



Fonte: Elaboração própria, de acordo com Lemos (2020).

O IVI_MATOPIBA, assim como o IVI de Lemos (2020), é um índice adimensional que possui escala de 0% a 100%. A interpretação dos seus valores é direta: quanto mais próximo de 100% for o valor do IVI_MATOPIBA para um determinado município, maior será o seu grau de vulnerabilidade induzida, considerando o conjunto das cinco privações analisadas (educação, renda, acesso à água, saneamento e coleta de lixo). Inversamente, valores do

IVI_MATOPIBA mais próximos de 0% indicarão uma menor incidência dessas vulnerabilidades induzidas no município.

5.2.3 Fundamentação teórica da análise fatorial no que se aplica o estudo

Para aferir os pesos tanto dos indicadores do VULAMBI_MATOPIBA quanto dos componentes do IVI_MATOPIBA, emprega-se a técnica de Análise Fatorial por meio da decomposição em componentes principais. O objetivo central desta abordagem é determinar os pesos de cada indicador na composição dos índices, baseando-se na estrutura de correlação e variância dos próprios dados (Hair *et al.*, 2009; Fávero & Belfiore, 2017).

5.2.3.1 Modelo de Análise Fatorial

A Análise Fatorial é uma técnica multivariada que busca identificar estruturas subjacentes em um conjunto de variáveis observadas, reduzindo a dimensionalidade dos dados por meio de variáveis latentes não observáveis (Johnson & Wichern, 2007). O modelo de análise fatorial define a relação entre as variáveis observadas e os fatores latentes conforme apresentado na Equação 1:

$$\mathbf{Z} = \alpha\mathbf{F} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (1)$$

onde \mathbf{Z} representa o vetor de variáveis observáveis padronizadas; \mathbf{F} constitui o vetor de fatores latentes não observáveis; α é uma matriz de cargas fatoriais que expressa a correlação entre as variáveis originais e os fatores; e “ $\boldsymbol{\varepsilon}$ ” representa o vetor de termos aleatórios de erro com distribuição normal multivariada (Fávero & Belfiore, 2017).

A Análise de Componentes Principais (ACP) é um método específico de Análise Fatorial que transforma o conjunto original de variáveis correlacionadas em um novo conjunto de variáveis não correlacionadas, chamadas componentes principais, ordenadas decrescentemente pela quantidade de variância explicada (Johnson & Wichern, 2007; Hair *et al.*, 2009).

5.2.3.2 Testes de Adequação

Antes da estimação da Análise Fatorial, a adequação dos dados foi verificada mediante dois testes complementares que avaliam se as variáveis possuem correlações suficientes para justificar a aplicação da técnica (Hair *et al.*, 2009): o Teste de Esfericidade de *Bartlett* que testa a hipótese nula (H_0) de que a matriz de correlação é uma matriz identidade, o que indicaria ausência de correlação entre as variáveis. A rejeição desta hipótese (p -valor < 0,05) indica que existe correlação suficiente entre as variáveis para justificar a aplicação da técnica (Fávero & Belfiore, 2017). E a estatística *Kaiser-Meyer-Olkin* (KMO) que avalia a adequação da amostra comparando as correlações simples com as correlações parciais observadas entre as variáveis. O teste KMO varia entre 0 e 1, devendo apresentar valores superiores a 0,5 para confirmar a adequação da amostra à análise fatorial (Kaiser, 1974; Hair *et al.*, 2009). O Quadro 5 apresenta os intervalos de classificação da estatística KMO conforme proposto por Fávero (2017):

Quadro 5 - Intervalos da estatística KMO para a adequação análise fatorial

Estatística KMO	Adequação para a Análise Fatorial
Entre 1,00 e 0,90	Muito boa
Entre 0,90 e 0,80	Boa
Entre 0,80 e 0,70	Média
Entre 0,70 e 0,60	Razoável
Entre 0,60 e 0,50	Má
Menor do que 0,50	Inaceitável

Fonte: Fávero (2017).

5.2.3.3 Procedimento de Estimação em Duas Etapas

O processo de estimação dos pesos segue duas etapas sequenciais, conforme recomendado por Lemos (2020) para a construção de índices compostos. Na primeira etapa o cálculo do VULAMBI_MATOPIBA, sendo uma ACP aplicada aos três indicadores ambientais (VULAGUA_MATOPIBA, VULSANE_MATOPIBA e VULLIXO_MATOPIBA), com extração de um único componente principal. Este procedimento permite condensar as três dimensões ambientais em um índice unidimensional que capture a variância comum entre esses indicadores.

Na segunda etapa, o cálculo do IVI_MATOPIBA, uma segunda ACP é aplicada aos três componentes do índice principal (VULEDUC_MATOPIBA, VULREND_MATOPIBA e VULAMBI_MATOPIBA recém-calculado), também com extração de um único componente. Este procedimento hierárquico garante que as vulnerabilidades sociais (educação e renda) e ambientais sejam adequadamente ponderadas na composição do índice final.

A extração de um único fator em ambas as etapas está alinhada ao objetivo de criar um índice composto único. Conseqüentemente, procedimentos de rotação fatorial (como *Varimax*) não são necessários, uma vez que a rotação é aplicável apenas quando dois ou mais fatores são extraídos (Hair *et al.*, 2009; Johnson & Wichern, 2007).

5.2.3.4 Cálculo dos Pesos (Scores Fatoriais)

Os pesos (P_j) de cada indicador são derivados diretamente das Cargas Fatoriais (L_j) que representam a correlação entre a variável observada e o fator latente extraído, obtidas na “Matriz de Componentes” da análise (Fávero & Belfiore, 2017).

Para garantir que a soma dos pesos seja igual a 1, as cargas fatoriais são normalizadas conforme apresentado na Equação 2:

$$P_j = \frac{L_j}{\sum_{j=1}^k L_j} \quad (2)$$

onde P_j é o peso final do indicador j , L_j é a carga fatorial do indicador j no primeiro componente, e k é o número total de indicadores no índice. Esta normalização garante que os pesos sejam proporcionais à contribuição relativa de cada variável à variância total explicada pelo componente (Johnson & Wichern, 2007).

Os índices VULAMBI_MATOPIBA e IVI_MATOPIBA são então calculados como médias ponderadas dos seus respectivos indicadores, utilizando os pesos (P_j) derivados da Equação 2. Uma vez que todas as variáveis de entrada se encontram em escala percentual (0-100), o índice final resultante (IVI_MATOPIBA) apresenta-se naturalmente nessa mesma escala, variando de 0 (vulnerabilidade mínima) a 100 (vulnerabilidade máxima), dispensando etapas adicionais de normalização (Lemos, 2020).

5.2.3.5 Classificação em Quintis

Para analisar a distribuição espacial do IVI distribuem-se os 337 municípios em quintis. O procedimento de classificação segue as seguintes etapas: (i) *ranking* de todos os municípios em ordem decrescente de seus respectivos IVI; (ii) distribuição dos casos por estrato de forma equitativa, considerando que o número total de municípios (337) não é múltiplo de cinco.

Para contornar essa dificuldade optou-se em usar os seguintes critérios: os três primeiros quintis (Q1, Q2 e Q3), representando os grupos de maiores vulnerabilidades, foram compostos por 67 municípios cada. Os dois últimos quintis (Q4 e Q5), representando os grupos de menores vulnerabilidades, foram compostos por 68 municípios cada, totalizando os 337 municípios da área de estudo.

Os quintis são designados conforme apresentado na Tabela 6, estabelecendo uma classificação hierarquizada das vulnerabilidades:

Tabela 6 - Classificação e Interpretação dos Quintis do IVI MATOPIBA

Quartil	Rótulo	Interpretação
Q1	Muito Alta	Municípios com os maiores índices de vulnerabilidade induzida
Q2	Alta	Municípios com elevados índices de vulnerabilidade
Q3	Média	Municípios com vulnerabilidade intermediária
Q4	Baixa	Municípios com reduzidos índices de vulnerabilidade
Q5	Muito Baixa	Municípios com os menores índices de vulnerabilidade induzida

Fonte: Elaboração feita com base nos resultados da pesquisa.

Esta classificação foi utilizada tanto para a análise estatística das médias do IVI_MATOPIBA por estrato quanto para a elaboração da cartografia temática, permitindo identificar claramente as regiões.

5.3 Resultados e discussão

A construção dos índices de vulnerabilidade induzida para a região do MATOPIBA teve como fundamento a técnica de Análise Fatorial, permitindo a identificação dos pesos relativos de cada dimensão analisada. Conforme está mostrado na Tabela 7, o Índice de Vulnerabilidade Ambiental (VULAMBI_MATOPIBA) foi composto por três indicadores principais: vulnerabilidade relacionada ao acesso à água (VULAGUA), ao saneamento básico (VULSANE) e à coleta de lixo (VULLIXO). Os resultados detalhados destes indicadores por município podem ser consultados no Anexo, ao final deste documento.

Tabela 7 – Pesos Fatoriais para Construção dos Índices de Vulnerabilidade (VULAMBI e IVI) na Região do MATOPIBA

INDICADORES VULAMBI_MATOPIBA			INDICADORES IVI_MATOPIBA		
INDICADORES VULAMBI_MATOPIBA	Cargas Fatoriais	Pesos	INDICADORES IVI_MATOPIBA	Cargas Fatoriais	Pesos
VULAGUA_MATOPIBA	0,826	0,37	VULEDUC_MATOPIBA	0,869	0,36
VULSANE_MATOPIBA	0,545	0,25	VULREND_MATOPIBA	0,749	0,31
VULLIXO_MATOPIBA	0,850	0,38	VULAMBI_MATOPIBA	0,816	0,34
Variância explicada pelo fator = 56,74%			Variância explicada pelo fator = 66,045%		
Teste de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) = 0,564			Teste de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) = 0,649		
Teste de <i>Bartlett</i> significativa a 0,000%			Teste de <i>Bartlett</i> significativa a 0,000%		

Fonte: Elaborada a partir dos resultados da pesquisa.

A decomposição em um único componente principal, utilizada para definir os pesos, apresentou uma variância explicada de 56,74% para os indicadores da vulnerabilidade ambiental (VULAMBI_MATOPIBA). Estes percentuais indicam que os fatores latentes extraídos captam a variabilidade conjunta dos indicadores observados (Hair *et al.*, 2009). Para os indicadores que definem o IVI_MATOPIBA, a variância explicada foi de 66,045%. A adequação estatística dos modelos foi confirmada pelo teste de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), que apresentou valores de 0,564 para o VULAMBI_MATOPIBA e 0,649 para o IVI_MATOPIBA, assegurando adequação dos dados para aplicação da Análise Fatorial pelo método de decomposição em componentes principais (Kaiser, 1974; Fávero & Belfiore, 2017).

O teste de esfericidade de *Bartlett* apresentou significância estatística ao nível de 0,000% ($p < 0,001$) para ambos os índices, rejeitando a hipótese nula de que a matriz de correlação entre as variáveis estudadas seja uma matriz identidade e confirmando a existência de correlações suficientes entre as variáveis para justificar a extração de fatores comuns (Hair *et al.*, 2009). Após a estimação dos pesos, realizada conforme a equação (3) da metodologia, apresenta-se a equação sobre a vulnerabilidade ambiental (VULAMBI).

$$\text{VULAMBI_MATOPIBA} = 0,37.\text{VULAGUA_MATOPIBA} + 0,25.\text{VULSANE_MATOPIBA} + 0,38.\text{VULLIXO_MATOPIBA} \quad (3)$$

Os valores apresentados na Tabela 8 foram calculados a partir da equação (3). A análise comparativa das médias estaduais de vulnerabilidade ambiental revelou diferenças entre

os estados que compõem a região do MATOPIBA. O Maranhão apresentou o maior índice médio de vulnerabilidade ambiental (48,27%), seguido pela Bahia (46,86%), Piauí (46,63%) e Tocantins (41,44%). No que se refere ao saneamento básico, todos os estados apresentaram elevadas vulnerabilidades, destacando o Piauí (79,35%), seguido por Bahia (75,84%), Tocantins (73,77%) e Maranhão (72,41%). Estes valores aproximam-se da média regional de 73,96%, destacando a falta de acesso ao saneamento adequado na região do MATOPIBA e refletindo desigualdades regionais no Brasil (Pimentel, 2024).

O acesso ao saneamento no país caracteriza-se por desigualdades que são tanto históricas quanto persistentes, dentre várias dimensões, incluindo aspectos regionais, sociais, espaciais, de raça/etnia e de gênero. Embora se observe uma expansão dos serviços de água e esgotamento sanitário no país ao longo do tempo, este avanço da cobertura não ocorreu de forma uniforme entre as regiões. Tal processo resultou em um desenvolvimento heterogêneo no território brasileiro. A vulnerabilidade se mostra grave no que se refere ao serviço de esgotamento sanitário, pois em 2019 foram estimadas que aproximadamente 100 milhões de brasileiros ainda não tinham acesso à coleta de esgoto (Camatta, Maciel & Miranda, 2022; Saiani, Toneto Júnior & Dourado, 2013; Pimentel, 2024).

Por outro lado, a vulnerabilidade relacionada ao acesso à água tratada mostrou-se relativamente menor, com média regional de 31,95%, sendo o Piauí o estado com melhor desempenho (28,42%) e o Maranhão com o pior (34,77%). A vulnerabilidade relacionada à coleta de lixo apresentou padrão intermediário, com média de 39,54% e destaque negativo para a Bahia (46,15%) e o Maranhão (45,9%).

Tabela 8 – Comparativo das Médias Estaduais de Vulnerabilidade Ambiental (VULAGUA, VULSANE, VULLIXO, VULAMBI) no MATOPIBA

Estado	VULAGUA _MATOPIBA (%)	VULSANE _MATOPIBA (%)	VULLIXO _MATOPIBA (%)	VULAMBI _MATOPIBA (%)
MA	34,77	72,41	45,9	48,27
TO	30,8	73,77	31,04	41,44
PI	28,42	79,35	43,34	46,63
BA	28,45	75,84	46,15	46,86
Totais	31,95	73,96	39,54	45,17

Fonte: Elaborada a partir dos resultados da pesquisa.

A equação (4), que define o Índice de Vulnerabilidade Induzida (IVI), é apresentada abaixo com os pesos estimados. Esses pesos foram calculados a partir dos resultados apresentados na Tabela 7:

$$IVI_MATOPIBA = 0,36.VULEDUC_MATOPIBA + 0,31.VULREND_MATOPIBA + 0,34.VULAMBI_MATOPIBA \quad (4)$$

Quando analisadas as dimensões que compõem o IVI_MATOPIBA (Tabela 3.4), observa-se que o estado do Maranhão apresentou o índice mais elevado de vulnerabilidade induzida (52,31%), superior à média regional de 45,37%. Refletindo a alta vulnerabilidade educacional (57,57%), vulnerabilidade de renda (50,61%) e vulnerabilidade ambiental (48,27%).

O estado do Piauí, embora apresente a maior vulnerabilidade educacional da região (58,00%), possui IVI intermediário (46,36%) devido à menor vulnerabilidade de renda (32,56%) em comparação ao Maranhão. A Bahia registrou IVI de 46,63%, com vulnerabilidades relativamente equilibradas nas três dimensões.

O estado de Tocantins destacou-se com o menor IVI regional (38,12%), resultado impulsionado pela menor vulnerabilidade de renda (21,70%), apesar de apresentar vulnerabilidades educacionais (49,16%) e ambientais (41,44%) elevadas (Tabela 9).

Essas evidências estão em conformidade com a pesquisa de Bolfe et al. (2016) que detectou que aproximadamente 85% dos estabelecimentos rurais na região do MATOPIBA concentra-se na entre 0 a 2 salários mínimos, apenas 5,22% da renda bruta. Na mesma região tem-se 1.020 estabelecimentos que ultrapassam os 200 salários mínimos mensais, com 60% da renda agrícola da região (Alves, Souza & Miranda, 2015; Bolfe *et al.*, 2016).

Tabela 9 – Comparativo Estadual das Médias dos Indicadores de Vulnerabilidade e do IVI MATOPIBA

Estado	VULEDUC _MATOPIBA (%)	VULREND _MATOPIBA (%)	VULAMBI _MATOPIBA (%)	IVI _MATOPIBA (%)
Maranhão	57,57	50,61	48,27	52,31
Tocantins	49,16	21,70	41,44	38,12
Piauí	58,00	32,56	46,63	46,36
Bahia	55,24	36,41	46,86	46,63
Totais	53,93	35,65	45,17	45,37

Fonte: Elaborada a partir dos resultados da pesquisa.

A distribuição espacial da vulnerabilidade, analisada através dos quintis do IVI_MATOPIBA (Tabela 10 e Figura 8), revelam forte concentração estadual das vulnerabilidades induzidas muito altas no estado do Maranhão. Com efeito, dos 67 municípios classificados no quintil de vulnerabilidade muito alta, 86,6% (58 municípios) estão no Maranhão, enquanto o estado do Tocantins não registrou qualquer município nesta categoria.

Tabela 10 - Composição Estadual dos Quintis do Índice de Vulnerabilidade Induzida (IVI MATOPIBA)

		ESTADO				Total
		BA	MA	PI	TO	
Quintis do IVI-MATOPIBA	Muito Alta	Nº de Municípios 4	58	5	0	67
		% 6,0%	86,6%	7,5%	0,0%	100,0%
	Alta	Nº de Municípios 14	35	11	7	67
		% 20,9%	52,2%	16,4%	10,4%	100,0%
	Média	Nº de Municípios 5	17	8	37	67
		% 7,5%	25,4%	11,9%	55,2%	100,0%
	Baixa	Nº de Municípios 3	12	4	49	68
		% 4,4%	17,6%	5,9%	72,1%	100,0%
	Muito Baixa	Nº de Municípios 4	13	5	46	68
		% 5,9%	19,1%	7,4%	67,6%	100,0%
Total	Nº de Municípios %	30 8,9%	135 40,1%	33 9,8%	139 41,2%	337 100,0%

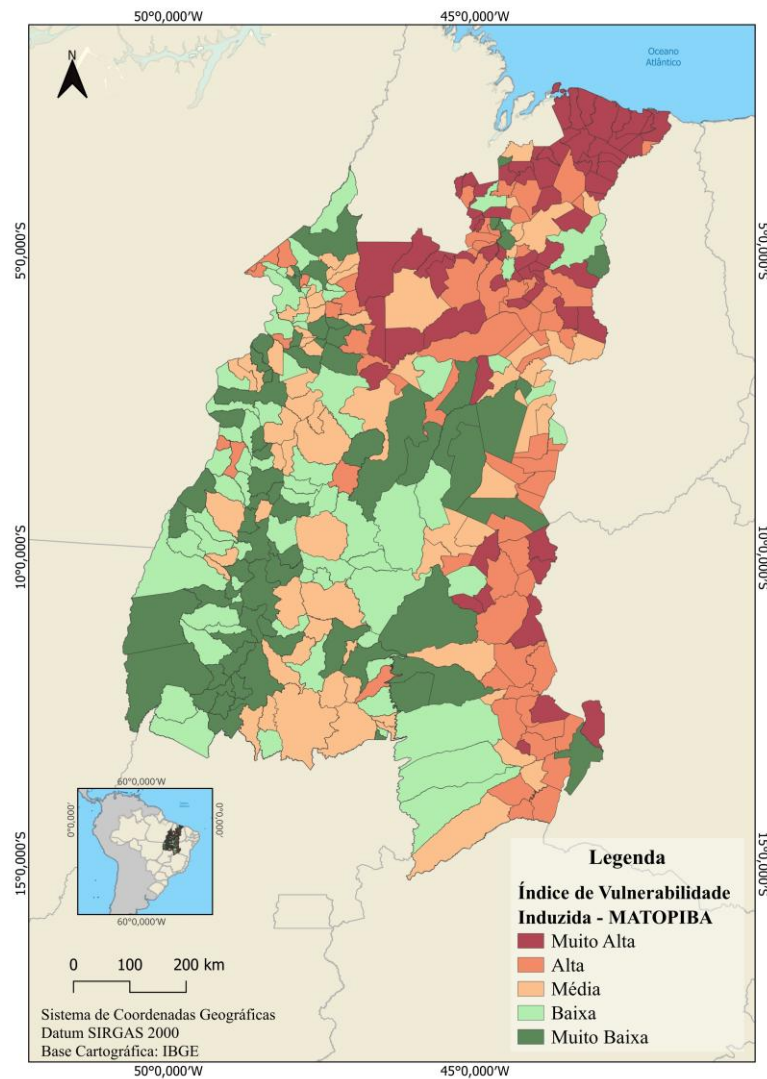
Fonte: Elaborada a partir dos resultados da pesquisa.

Em relação aos quintis de vulnerabilidade baixa e muito baixa, o estado do Tocantins concentra 72,1% e 67,6% dos municípios, respectivamente, diferente da presença dos demais estados. O Piauí e a Bahia apresentam distribuição mais heterogênea, com representação em todos os quintis, embora predomine nos estratos de vulnerabilidade média a alta.

Análises do Coeficiente de Gini para renda nos anos 2000 revelaram que, tanto no Maranhão quanto na Bahia, os municípios com presença de soja (mais de 300 ha) apresentaram uma desigualdade de renda maior do que aqueles com pouca ou nenhuma soja. Esse aumento da desigualdade de renda no Maranhão e Bahia reflete uma concentração de riqueza no MATOPIBA, onde uma pequena fração de grandes propriedades agrícolas controla a maior

parte da renda rural, enquanto a vasta maioria dos estabelecimentos rurais gera uma renda muito baixa. Fatores como uma agricultura mecanizada, baixa demanda de mão de obra, e concentração de terras, bem como o deslocamento de populações tradicionais contribuem para essa disparidade (Bolfé *et al.*, 2016; Martinelli *et al.*, 2017).

Figura 8 – Distribuição Espacial do Índice de Vulnerabilidade Induzida (IVI_MATOPIBA) na região do MATOPIBA por Quintis no ano de 2022.



Fonte: Elaborada a partir dos resultados da pesquisa.

5.4 Conclusão

Este estudo alcançou seus objetivos específicos ao avaliar e quantificar as vulnerabilidades socioeconômicas dos 337 municípios da região MATOPIBA por meio do Índice de Vulnerabilidade Induzida (IVI_MATOPIBA). A adaptação da metodologia de Lemos (2020) para a região permitiu mensurar as carências relacionadas ao acesso à renda, educação,

saneamento básico, coleta de lixo e água encanada. Os resultados comprovaram diferenças entre os estados: Maranhão apresentou IVI de 52,31%, Piauí 46,36%, Bahia 46,63% e Tocantins 38,12%, confirmando a distribuição heterogênea das vulnerabilidades na região. No que se refere às dimensões específicas, a pesquisa identificou que a vulnerabilidade educacional (53,93%) e a de saneamento básico (73,96%) constituem os principais déficits, enquanto a vulnerabilidade ambiental (45,17%) e de renda (35,65%) apresentam padrões intermediários. A análise dos quintis revelou que 86,6% dos municípios com vulnerabilidade muito alta concentram-se no Maranhão, enquanto Tocantins concentra 72,1% dos municípios com baixa vulnerabilidade. Esses resultados quantificados reforçam que a modernização agrícola e a expansão do agronegócio no MATOPIBA não resultaram em desenvolvimento socioeconômico inclusivo, mas reproduziram e intensificaram a desigualdade. Conclui-se que as vulnerabilidades induzidas identificadas necessitam de políticas públicas, com atuações que conciliem crescimento econômico com inclusão social e proteção ambiental.

6 MUDANÇAS NO USO E COBERTURA DA TERRA NO MATOPIBA: AVALIAÇÃO GEOESPACIAL

RESUMO

Este estudo analisa as mudanças no uso e cobertura da terra no MATOPIBA, fronteira agrícola situada nos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, onde a expansão do agronegócio impacta ecossistemas locais pela conversão de vegetação nativa. Neste sentido, o artigo tem como objetivo analisar as transformações espaço-temporais no uso e cobertura da terra, bem como as transições associadas na região do MATOPIBA entre os anos de 1985 e 2023. O trabalho utilizou dados do MapBiomias na plataforma digital *Google Earth Engine* (GEE) e o *software* QGIS. A metodologia consistiu em técnicas de sensoriamento remoto, que permitem analisar séries temporais por meio de imagens de satélite e identificar padrões de mudança no uso e cobertura da terra. Os resultados obtidos mostram que, nos últimos 37 anos, houve redução de 28% da Formação Savânica e 27% da Formação Florestal. Em contrapartida, a cultura da soja cresceu para 4,70 milhões de hectares. A conversão de vegetação natural para agropecuária totalizou 18,03 milhões de hectares, superando a regeneração natural. Com isso, observou-se que essa expansão ameaça a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos do Cerrado, sendo necessárias políticas que possam alcançar o desenvolvimento econômico e a conservação ambiental garantindo a sustentabilidade regional.

Palavras-chave: sensoriamento remoto; MapBiomias; cerrado; vegetação natural; soja.

LAND USE AND LAND COVER CHANGES IN MATOPIBA: A GEOSPATIAL ASSESSMENT

ABSTRACT

This study analyzes the land use and land cover changes in MATOPIBA, an agricultural frontier in the Brazilian states of Maranhão, Tocantins, Piauí, and Bahia, where agribusiness expansion impacts local ecosystems through the conversion of native vegetation. Accordingly, this paper aims to analyze the spatio-temporal transformations in land use and land cover, as well as the associated transitions, in the MATOPIBA region between 1985 and 2023. The study utilized data from MapBiomas on the Google Earth Engine (GEE) digital platform and QGIS software. The methodology consisted of remote sensing techniques, which allow for the analysis of time series via satellite imagery and the identification of patterns in land use and land cover change. The results show that, in the last 37 years, there was a 28% reduction in Savanna Formation and a 27% reduction in Forest Formation. Conversely, soybean cultivation grew to 4.70 million hectares. The conversion of natural vegetation to agriculture and pasture totaled 18.03 million hectares, exceeding natural regeneration. It was observed that this expansion threatens the biodiversity and ecosystem services of the Cerrado, necessitating policies that can achieve economic development and environmental conservation, thereby ensuring regional sustainability.

Keywords: remote sensing; MapBiomas; cerrado; natural vegetation; soybean.

6.1 Introdução

No contexto das mudanças ambientais e socioeconômicas, a análise da evolução espacial e temporal do uso e da cobertura da terra se mostra relevante, em novas fronteiras agrícolas como a região do MATOPIBA. Composta pelos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, essa região tem adentrado de modo mais incisivo no cenário nacional, em virtude da expansão do cultivo de grãos, como a soja e o milho. Tal avanço, que se encontra ancorado em políticas de desenvolvimento e em investimentos em infraestrutura, tem provocado, como decorrência, impactos sobre os ecossistemas locais. Tais impactos se manifestam principalmente pela conversão de áreas de vegetação nativa, como o Cerrado, em terras agrícolas e pastagens, gerando preocupações no âmbito social e ambiental (Miranda *et al.*, 2014; Bühler & Oliveira, 2018; Sano, 2019; Espindola *et al.*, 2021; Ferraz-Almeida & Mota, 2021).

Este espaço geográfico, por reunir um conjunto de ecossistemas com predominância do Cerrado, mas também por envolver áreas da Caatinga e da Amazônia, se configura como uma área estratégica para a compreensão das transformações territoriais. Tais mudanças apresentam implicações multidimensionais, que vão desde os impactos sobre a biodiversidade até as reconfigurações socioespaciais na região, em decorrência da expansão acelerada das culturas agrícolas mecanizadas e do agronegócio globalizado (Lahsen *et al.*, 2016; Sauer & Leite, 2012).

A delimitação oficial do MATOPIBA, instituída pelo Decreto n.º 8.447, de 6 de maio de 2015, compreende 337 municípios distribuídos em uma área de aproximadamente 73 milhões de hectares, abrangendo 33% do território do estado do Maranhão (135 municípios), 38% do Tocantins (139 municípios), 11% do Piauí (33 municípios) e 18% da Bahia (30 municípios) (Belchior, Alcantara & Barbosa, 2017; Pereira, Castro & Porcionato, 2018).

Esta formação territorial do MATOPIBA representa uma construção socioespacial particular no contexto brasileiro, tendo em vista que não se configura como uma unidade político-administrativa formal, mas como um espaço de planejamento estratégico. A concepção dessa área está baseada em atributos edafoclimáticos, socioeconômicos e de infraestrutura, sendo uma região propícia para a agricultura de larga escala e voltada principalmente para cultivos como a soja, o milho e o algodão (Boechat *et al.*, 2023; Hershaw & Sauer, 2023).

A região do MATOPIBA deve ser compreendida para além das transformações dos sistemas globais agroalimentares. Tal processo, dessa reconfiguração territorial, é caracterizado pela financeirização da agricultura, pela concentração fundiária e pela integração vertical das cadeias produtivas (Boechat *et al.*, 2023; Hershaw & Sauer, 2023). Especialmente, esta

formação se manifesta pela expansão das fronteiras agrícolas sobre ecossistemas naturais, uma dinâmica que não somente ocorre no Brasil, mas também em diversas regiões do hemisfério sul, como no Chaco Argentino, no Paraguai e nas savanas africanas. Esse padrão de desenvolvimento agrário privilegia a produção de commodities em detrimento da conservação da biodiversidade e dos modos de vida tradicionais (Gasparri, Grau & Angonese, 2013; Gasparri & Waroux, 2015; Gasparri *et al.*, 2016; Wesz Junior, 2022).

O avanço acelerado da fronteira agrícola na região do MATOPIBA tem sido objeto de preocupação, tendo em vista que a substituição de ecossistemas savânicos, como o Cerrado, por monoculturas, compromete serviços ecossistêmicos essenciais. Como decorrência, observam-se severos impactos ambientais, que se manifestam na perda de biodiversidade, na degradação dos solos, em alterações na regulação climática e nos ciclos hídricos, bem como no aumento das emissões de gases de efeito estufa associadas à conversão da vegetação nativa (Lahsen, Bustamante & Dalla-Nora, 2016; Spera *et al.*, 2016; Noojipady *et al.*, 2017; Rodrigues *et al.*, 2022; Marengo *et al.*, 2022).

Foi a partir da década de 1980, que a região do MATOPIBA vivenciou uma complexa trajetória de transformações socioecológicas e de uso da terra. Este processo, que teve seu início em políticas de incentivo à ocupação dos cerrados, evoluiu para a conjuntura atual, marcada pela intensificação dos fluxos de capital e tecnologia direcionados ao avanço da agricultura mecanizada e da pecuária (Bernardes, 2015; Eloy *et al.*, 2016). Como decorrência, observou-se a progressiva substituição de formações savânicas nativas por monoculturas de commodities, fenômeno que insere o espaço rural brasileiro nas cadeias globais de valor do agronegócio (Martinelli *et al.*, 2017).

Nessa perspectiva, a análise desses processos é fundamental para a elaboração de políticas públicas que visam promover o desenvolvimento sustentável e a conservação da biodiversidade, bem como para subsidiar o planejamento territorial e a gestão dos recursos naturais na região do MATOPIBA (Matricardi *et al.*, 2018; Agostinho *et al.*, 2023; Araújo *et al.*, 2024).

Diante do exposto, o envolvimento do sensoriamento remoto, para a caracterização biofísica da paisagem, permitindo a construção de séries históricas e a quantificação das mudanças na cobertura da terra, torna-se fundamental para a compreensão da dinâmica territorial, bem como compreender e mitigar os impactos ambientais associados à expansão das fronteiras agrícolas nos trópicos (Gibbs *et al.*, 2010; Nepstad *et al.*, 2014). As experiências em âmbito internacional demonstram que a disponibilidade de informações confiáveis sobre o uso e a cobertura da terra são fundamentais para a governança ambiental e territorial.

Tal premissa se sustenta, tendo em vista que esses dados permitem o monitoramento de compromissos voltados à conservação da biodiversidade, à redução do desmatamento e à mitigação dos efeitos advindos das instabilidades climáticas (Hansen *et al.*, 2013; Achard *et al.*, 2014). No contexto brasileiro, iniciativas como o MapBiomas desempenham um papel importante, que se manifesta tanto na democratização do acesso aos dados ambientais quanto no fortalecimento da capacidade da sociedade civil para monitorar e incidir sobre as políticas de uso do território (Souza Júnior *et al.*, 2020; Azevedo *et al.*, 2017).

A iniciativa MapBiomas, representa um avanço na organização de dados espaciais como o uso e a cobertura da terra no Brasil. O projeto disponibiliza séries históricas anuais para todo o território nacional desde 1985, com resolução espacial de 30 metros (Souza Júnior *et al.*, 2020). Sendo fundamental para a compreensão das dinâmicas territoriais brasileiras, principalmente nas fronteiras agrícolas.

Nestas áreas, os processos de conversão de vegetação nativa em sistemas produtivos ocorrem com maior intensidade e velocidade (Alencar *et al.*, 2020; Parente *et al.*, 2019). Ancorada no processamento de imagens multiespectrais dos satélites *Landsat* em ambiente de computação em nuvem e na aplicação de algoritmos de aprendizado de máquina, permite a classificação de extensas áreas com precisão satisfatória. Tal abordagem constitui, portanto, um avanço para o monitoramento ambiental em escala continental (Gorelick *et al.*, 2017; Souza Júnior *et al.*, 2020).

Com isso, este artigo tem como objetivo analisar as transformações espaço-temporais no uso e cobertura da terra (LULC - *Land Use and Land Cover*), bem como as transições associadas na região do MATOPIBA entre 1985 e 2023. Utilizando técnicas de sensoriamento remoto, que permitem a análise de séries temporais de imagens de satélite e a identificação de padrões de mudança no uso e cobertura da terra, por meio do projeto MapBiomas.

O estudo está estruturado em quatro seções principais, além desta introdução. A seção seguinte apresenta a metodologia que orienta a investigação, detalhando os procedimentos de aquisição, processamento e análise dos dados espaciais. A terceira seção expõe os resultados, destacando as dinâmicas de uso e cobertura da terra ao longo do período analisado. A quarta seção apresenta as considerações finais, sintetizando as contribuições do estudo.

6.2 Materiais e métodos

6.2.1. Área de estudo

O trabalho se desenvolveu na região do MATOPIBA, acrônimo formado pelos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, que envolve 337 municípios em uma área de aproximadamente 73 milhões de hectares. Uma região que tem características predominantemente do bioma Cerrado (91%), considerado um dos *hotspots* mundiais devido à sua rica biodiversidade. Incluindo também porções dos biomas Amazônia (7,3%) e Caatinga (1,6%) (Strassburg *et al.*, 2017; Polizel *et al.*, 2021). Além dessa diversidade, a região possui chuvas regulares, que variam de 1.000 a 1.900 mm anuais, e temperaturas médias superiores a 25 °C (Alvares *et al.*, 2013; Ribeiro e Walter, 2008; Santos; Naval, 2021).

6.2.2 Abordagem do uso e cobertura da terra e suas transições

Para alcançar os objetivos propostos, o estudo utilizou técnicas de sensoriamento remoto para mapear o uso e cobertura da terra, bem como de suas transições. Tais técnicas têm sido continuamente desenvolvidas e aperfeiçoadas há mais de quatro décadas, com avanços em suas metodologias e tecnologias (Strahler, 1980; Loveland *et al.*, 1991).

A análise baseou-se em dados do programa *Landsat*, operado pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e pelo *United States Geological Survey* (USGS). Este programa fornece um extenso registro de imagens de satélite com resolução de 30 m, disponíveis desde a década de 1980, possibilitando a análise histórica e espaço-temporal da cobertura e do uso da terra (Goward & Williams, 1997; Wulder *et al.*, 2022; Potapov *et al.*, 2022). Esses dados combinados com técnicas avançadas de aprendizado de máquina e recursos de computação de alto desempenho, como os desenvolvidos no projeto MapBiomias, tem permitido alcançar elevada precisão na classificação e na detecção de mudanças.

Com isso, a análise da evolução temporal do uso e da cobertura da terra, assim como as transições da área de estudo foram realizadas por meio do Projeto MapBiomias, utilizando a plataforma *Google Earth Engine*, para a região do MATOPIBA entre os anos de 1985 e 2023 (Coleção 9). Processados no *software* QGIS 3.42.3. O banco de dados em formato *shapefile* com os limites territoriais nacionais, estaduais e municipais foi obtido no site do IBGE, permitindo uma análise espacial precisa (Souza Júnior *et al.*, 2020; Potapov *et al.*, 2022; Southworth *et al.*, 2023).

As classes de uso e cobertura seguem uma hierarquização padronizada pelo MapBiomas, contemplando formações florestais, savânicas, campestres, áreas úmidas, agropecuária, áreas não vegetadas e corpos d'água (MapBiomas, 2023), descritas na Tabela 11.

Tabela 11 - Sistema de classificação do Uso e Cobertura da Terra do MapBiomas. *Continua*

Nível 1	Nível 2	Nível 3	Descrição
Formação Florestal	Formação Florestal	—	Abrange tipos de vegetação onde predominam espécies arbóreas que constituem copas densas, englobando Matas Ciliares, Matas de Galeria e Cerradão.
	Formação Savânica	—	Corresponde a um conjunto específico de fisionomias do bioma Cerrado que se caracterizam por uma definida estratificação da vegetação, sendo composta pelo Cerrado Denso, Típico, Ralo e Rupestre.
	Mangue	—	Engloba formações florestais e/ou arbustivas densas e perenes, que estão associadas ao ecossistema costeiro e são frequentemente inundadas pela maré.
	Floresta Alagável	—	Refere-se a florestas que se estabelecem nas margens de cursos d'água, ocupando planícies e terraços que são inundados de forma periódica ou permanente.
Formação Natural não Florestal	Campo Alagado e Área Pantanosa	—	Designa ecossistemas onde a vegetação herbácea é dominante, estando sujeitos a inundações sazonais ou a uma influência constante de rios ou lagos.
	Formação Campestre	—	Caracteriza-se por uma vegetação aberta em que dominam espécies herbáceas, com pouca ou nenhuma cobertura arbórea, como os Campos Limpo e Rupestre.
	Apicum	—	São formações geralmente sem vegetação arbórea, localizadas em zonas hipersalinas e topograficamente mais elevadas na planície costeira, tipicamente na transição do manguezal para a terra firme.
Agropecuária	Pastagem	—	Inclui áreas de pasto, em sua maioria plantadas, que estão diretamente associadas as atividades de pecuária. As pastagens naturais são, em geral, classificadas como formação campestre.
	Silvicultura	—	Corresponde ao plantio de espécies de árvores para finalidades comerciais, como pinus e eucalipto.

Tabela 11 - Sistema de classificação do Uso e Cobertura da Terra do MapBiomas. *Conclusão*

Lavoura Temporária	Soja	Refere-se às áreas dedicadas à monocultura da soja durante a primeira safra.	
	Cana	São áreas cultivadas com a monocultura da cana-de-açúcar.	
	Arroz	Designa áreas de cultivo de arroz que utilizam exclusivamente o sistema de irrigação.	
	Algodão	Refere-se às áreas dedicadas à monocultura do algodão herbáceo durante a primeira safra.	
	Outras Lavouras Temporárias	Abrange cultivos agrícolas de ciclo curto ou médio, que usualmente é inferior a um ano, exigindo novo plantio após cada colheita.	
Lavoura Perene	Café	Corresponde às áreas cultivadas com a monocultura de café.	
	Outras Lavouras Perenes	São áreas com cultivos agrícolas de ciclo vegetativo longo (superior a um ano), que possibilitam colheitas sucessivas sem a necessidade de replantio.	
Mosaico de Usos	—	Corresponde às paisagens de uso agropecuário nas quais não é possível fazer uma distinção clara entre áreas de pastagem e de agricultura, podendo também abranger ocupações periurbanas como chácaras e sítios.	
Área Não Vegetada	Praia, Duna e Areal	—	São cordões de areia com coloração clara e brilhante, nos quais não há predomínio de qualquer tipo de vegetação.
	Afloramento Rochoso	—	São superfícies de rochas expostas naturalmente, apresentando pouca ou nenhuma vegetação e cobertura de solo.
	Área Urbanizada	—	Refere-se às áreas que possuem alta densidade de edificações e vias, abrangendo infraestruturas e espaços livres de construções.
	Mineração	—	Designa áreas de extração de minerais, seja industrial ou de garimpo, onde o solo fica exposto pela ação humana.
	Outras Áreas não Vegetadas	—	Abrange áreas de solo exposto por causas naturais (como deslizamentos) e superfícies impermeáveis (como infraestruturas) que não foram mapeadas em suas classes específicas.
Corpos D'água	Rio, Lago e Oceano	—	Inclui rios, lagos, represas, reservatórios e outras massas de água.
	Aquicultura	—	São lagos artificiais utilizados predominantemente para atividades de aquicultura ou salicultura.

Fonte: Elaboração com base nos dados do MapBiomias (2023).

As classes de transição representam as mudanças no uso e cobertura da terra, identificadas pela diferença entre as classificações anuais do período de estudo. A Tabela 12 apresenta o sistema de classes adaptado para a região do MATOPIBA, cujo agrupamento foi realizado com o objetivo de destacar as dinâmicas de mudança mais relevantes e intrínsecas à área de estudo.

Tabela 12 – Sistema de classificação adaptada para o MATOPIBA (1985-2023)

Classes	Descrição
Conversão de Vegetação Natural para Agropecuária / Área não Vegetada	Áreas onde houve conversão de vegetação nativa para usos agropecuários e áreas não vegetadas.
Regeneração de Vegetação Natural	Áreas previamente convertidas para uso agropecuário que apresentaram processo de regeneração da vegetação natural.
Ganho de Água	Áreas que se tornaram corpos d'água.
Perda de Água	Corpos d'água que foram convertidos para outros usos.
Área Estável (sem transição)	Áreas que permaneceram na mesma classe
Transições internas	Aqui estão as mudanças entre classes de um mesmo grande grupo, por exemplo, uma área de pastagem que se tornou um mosaico de uso, ou um tipo de floresta que se tornou outra.
Degradação do Solo	Transição de áreas de cobertura vegetal (natural ou antrópica) para classes de solo exposto, como afloramento rochoso, indicando um possível processo de degradação.

Fonte: Elaboração de acordo com os dados do Projeto MapBiomias (Coleção 9).

6.3 Resultado e discussão

6.3.1 Avaliação do uso e cobertura da terra na região do matopiba entre 1985 e 2023

Na tabela 13 mostra-se a evolução temporal do uso e cobertura da terra (LULC) existentes na região do MATOPIBA entre 1985 e 2023. Observa-se que a classe que mais se destacou foi a Formação Savânica, tipo de vegetação mais abundante no bioma Cerrado, que em 1985 ocupava 40,52 milhões de hectares (Mha), ou 55,01% de área, apresentando uma

redução de 28%, cobrindo 29,12 Mha (34,26%) em 2023, revelando transformações na paisagem, principalmente pela expansão das atividades agropecuárias pela perda da vegetação nativa (Polizel *et al.*, 2021).

Concomitantemente, observa-se a redução das áreas da classe de formação florestal, que ocupavam 16,74 milhões de hectares (Mha) em 1985, representando 22,73% da área mapeada, sofreram redução de 27% ao longo do período analisado, restando apenas 12,22 Mha (14,38%) em 2023. Tais reduções na vegetação nativa confirmam a região como uma das principais fronteiras de expansão agrícola do Brasil, onde a conversão do Cerrado tem ocorrido de forma acelerada nas últimas décadas (Spera *et al.*, 2016; Zalles *et al.*, 2019).

A expansão agropecuária apresentou dinâmicas distintas entre pastagens e agricultura. As áreas de pastagem cresceram de 3,45 Mha (4,68%) em 1985 para 15,61 Mha (18,36%) em 2023, representando um incremento de 352%. Contudo, o fenômeno mais expressivo foi a expansão agrícola, que saltou de apenas 0,25 Mha (0,34%) para 5,93 Mha (6,97%), configurando um crescimento de 2.277%. No setor agrícola, as lavouras temporárias dominaram essa expansão, crescendo de 0,19 Mha para 5,87 Mha, um aumento de 3.032%. A soja emergiu como o principal fator dessa transformação, expandindo-se de área praticamente inexistente em 1985 para 4,70 Mha em 2023, representando atualmente 5,53% da área total mapeada. Esta expansão da soja no MATOPIBA são consequências de um conjunto de sinergias como o acesso a políticas públicas, baixo preço da terra, condições favoráveis de clima e solo, bem como uma topografia que permite uma mecanização da agricultura. Além disso, a região está próxima do Porto do Itaqui na cidade de São Luís (MA) facilitando a exportação dos grãos (EMBRAPA, 2013; Anderson *et al.*, 2016; Araújo *et al.*, 2019; Araújo *et al.*, 2024).

Tabela 13 - Evolução temporal do Uso e Cobertura da terra (LULC) na região do MATOPIBA entre 1985 e 2023.

Continua

Classes	1985		1995		2006		2015		2021		2023		1985-2023	
	Área (Mha)	% Área Mapeada	Área (Mha)	% Área Mapeada	Área (Mha)	% Área Mapeada	Área (Mha)	% Área Mapeada	Área (Mha)	% Área Mapeada	Área (Mha)	% Área Mapeada	Variação Total	Variação Percentual Total
Formação Florestal	16,74	22,73%	15,08	20,11%	13,81	17,56%	13,07	15,76%	12,58	14,83%	12,22	14,38%	-4,52	-27%
Formação Savânica	40,52	55,01%	38,73	51,64%	35,84	45,56%	32,68	39,41%	30,60	36,07%	29,12	34,26%	-11,39	-28%
Mangue	0,08	0,11%	0,08	0,11%	0,08	0,10%	0,08	0,10%	0,08	0,10%	0,08	0,10%	0,01	8%
Floresta Alagável	0,45	0,61%	0,29	0,39%	0,18	0,23%	0,19	0,23%	0,18	0,21%	0,14	0,16%	-0,31	-69%
Campo Alagado e Área Pantanosa	2,33	3,17%	2,23	2,98%	2,23	2,84%	2,23	2,69%	2,23	2,62%	2,22	2,61%	-0,11	-5%
Formação Campestre	3,94	5,35%	3,69	4,93%	3,43	4,36%	3,18	3,84%	3,05	3,60%	2,93	3,45%	-1,00	-26%
Apicum	0,01	0,01%	0,01	0,01%	0,01	0,01%	0,01	0,01%	0,01	0,01%	0,01	0,01%	0,00	-24%
Afloramento Rochoso	0,11	0,15%	0,11	0,15%	0,11	0,14%	0,11	0,13%	0,11	0,13%	0,11	0,13%	0,00	0%
Pastagem	3,45	4,68%	8,37	11,16%	12,11	15,39%	14,31	17,25%	15,00	17,68%	15,61	18,36%	12,16	352%
Agricultura	0,25	0,34%	0,92	1,22%	2,75	3,50%	4,89	5,89%	5,84	6,89%	5,93	6,97%	5,68	2277%
Lavoura Temporária	0,19	0,25%	0,89	1,19%	2,73	3,47%	4,86	5,86%	5,79	6,82%	5,87	6,91%	5,69	3032%
Soja	0,00	0,00%	0,34	0,46%	1,67	2,12%	3,28	3,96%	4,40	5,19%	4,70	5,53%	4,70	343912%
Cana	0,00	0,00%	0,00	0,00%	0,01	0,02%	0,02	0,03%	0,03	0,03%	0,02	0,03%	0,02	-
Arroz	0,00	0,00%	0,01	0,02%	0,02	0,02%	0,08	0,09%	0,10	0,11%	0,10	0,12%	0,10	11393%
Algodão	0,00	0,00%	0,00	0,00%	0,06	0,07%	0,08	0,10%	0,15	0,18%	0,20	0,24%	0,20	-
Outras Lavouras Temporárias	0,19	0,25%	0,53	0,71%	0,97	1,23%	1,40	1,69%	1,11	1,31%	0,84	0,99%	0,66	356%

Tabela 13 - Evolução temporal do Uso e Cobertura da terra (LULC) na região do MATOPIBA entre 1985 e 2023.

Conclusão

Lavoura Perene	0,06	0,08%	0,03	0,04%	0,03	0,04%	0,03	0,03%	0,05	0,06%	0,05	0,06%	-0,01	-15%
Café	0,03	0,05%	0,02	0,03%	0,02	0,02%	0,02	0,02%	0,02	0,02%	0,02	0,02%	-0,02	-49%
Outras Lavouras Perenes	0,03	0,04%	0,01	0,01%	0,01	0,01%	0,01	0,01%	0,04	0,04%	0,03	0,04%	0,01	28%
Silvicultura	0,00	0,00%	0,02	0,03%	0,07	0,09%	0,20	0,24%	0,25	0,30%	0,25	0,30%	0,25	190826%
Mosaico de Usos	4,24	5,75%	2,62	3,49%	1,46	1,86%	1,09	1,31%	2,09	2,46%	3,31	3,89%	-0,92	-22%
Praia, Duna e Areal	0,10	0,13%	0,10	0,14%	0,11	0,14%	0,11	0,13%	0,10	0,12%	0,10	0,12%	0,00	0%
Área Urbanizada	0,07	0,10%	0,11	0,15%	0,13	0,17%	0,16	0,19%	0,17	0,20%	0,17	0,20%	0,10	131%
Mineração	0,00	0,00%	0,00	0,00%	0,00	0,00%	0,00	0,00%	0,00	0,00%	0,00	0,00%	0,00	1142%
Outras Áreas não Vegetadas	0,36	0,48%	0,27	0,36%	0,28	0,35%	0,32	0,38%	0,31	0,37%	0,38	0,44%	0,02	6%
Rio, Lago e Oceano	0,52	0,70%	0,52	0,69%	0,54	0,68%	0,53	0,64%	0,53	0,63%	0,57	0,67%	0,05	10%
Aquicultura	0,00	0,00%	0,00	0,00%	0,00	0,00%	0,00	0,00%	0,00	0,00%	0,00	0,00%	0,00	-87%

Fonte: Elaboração de acordo com os dados do Projeto MapBiomias (Coleção 9).

A análise temporal revela que a intensificação do processo de conversão ocorreu principalmente após 1995, com aceleração entre 2006 e 2015, período no qual a área de soja dobrou praticamente de 1,67 Mha para 3,28 Mha. Este período coincide com a alta nos preços internacionais das commodities agrícolas e implementação de políticas públicas de desenvolvimento regional (Pereira & Pauli, 2019; Pires, 2020; Harding, Herzberg & Kuralbayeva, 2021). O cultivo de algodão herbáceo também apresentou expansão notável, especialmente após 2015, alcançando 0,20 Mha em 2023, evidenciando a diversificação agrícola (Freitas, 2022).

Os ecossistemas aquáticos e úmidos demonstraram diferentes níveis de resiliência. Enquanto o mangue manteve-se relativamente estável em 0,08 Mha durante todo o período, a floresta alagável sofreu redução de 69%, declinando de 0,45 Mha para 0,14 Mha. Os campos alagados e áreas pantanosas apresentaram redução modesta de 5%, mantendo-se em aproximadamente 2,22 Mha. A vulnerabilidade das áreas úmidas está ligada a fragilidade da legislação ambiental brasileira, na Lei de Proteção à Vegetação Nativa (nº 12.651, maio de 2012). Embora haja definição sobre as áreas úmidas, a lei não estabelece regras claras e uniformes para sua proteção, favorecendo a conversão desses ecossistemas devido à pressão econômica do agronegócio. Além disso, o desconhecimento sobre a importância hídrica dessas áreas resulta na degradação contínua desses ecossistemas vitais, comprometendo a segurança hídrica, a biodiversidade e o equilíbrio climático da região (Pitta & Vega, 2017; Durigan *et al.*, 2022; Arruda *et al.*, 2024).

Além disso, constatou-se que a área urbanizada, teve um aumento de 131% no período 1985-2023, expandindo de 0,07 Mha para 0,17 Mha, que conforme Pereira, Porcionato e Castro (2018) e Buzato *et al.* (2018), o avanço da soja, acompanhado por um crescimento econômico, na região impactou a dinâmica populacional. Em 2000, a população da região era de 5.106.488 habitantes, passando para 6.212.600 habitantes em 2022 (IBGE, 2022).

A silvicultura surgiu como novo componente da paisagem, inexistente em 1985 e que alcançou 0,25 Mha em 2023, refletindo a diversificação econômica regional. O comportamento da classe “Mosaico de Usos” apresentou redução de 4,24 Mha em 1985 para 1,09 Mha em 2015, mas houve recuperação parcial para 3,31 Mha em 2023.

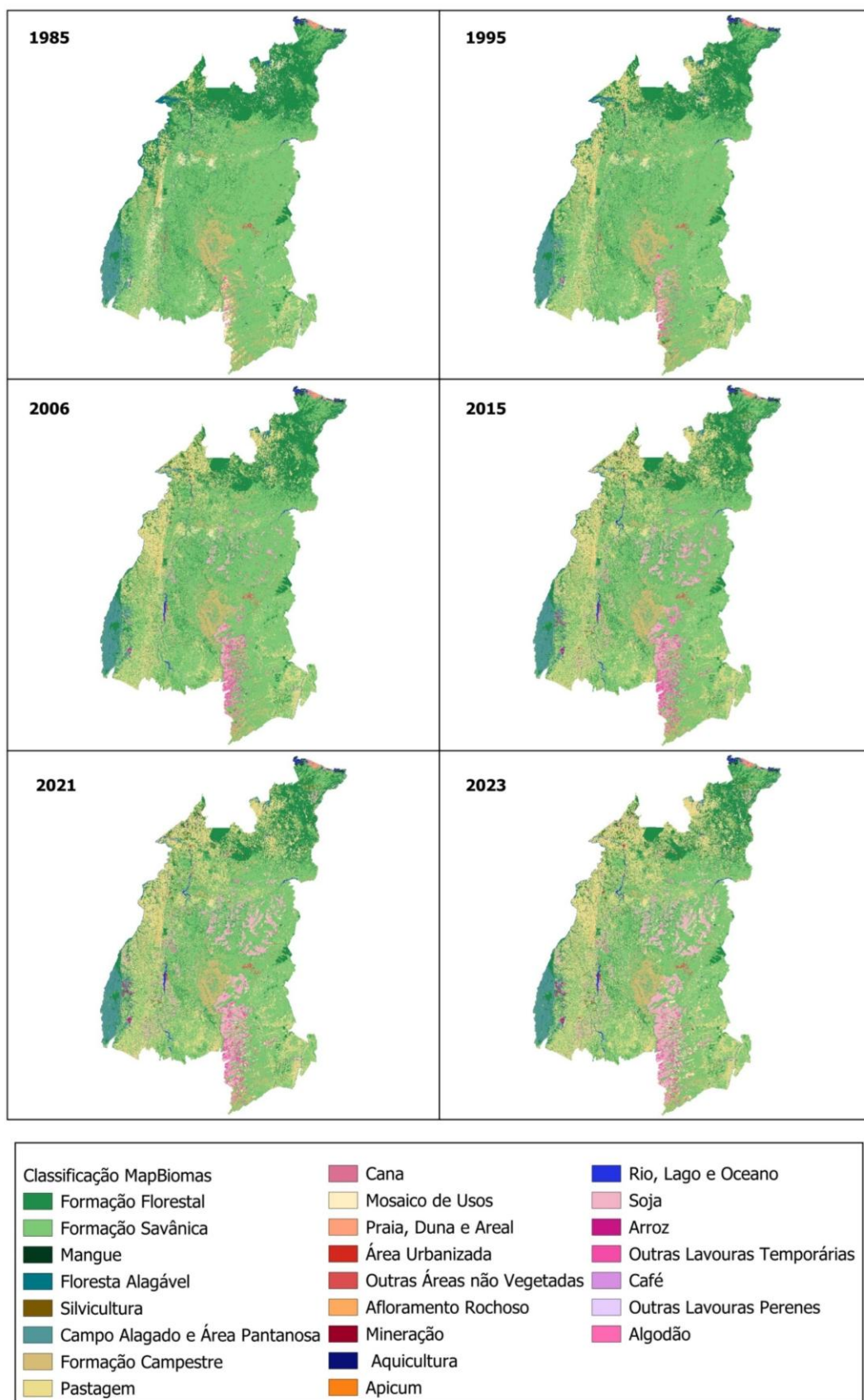
As transformações na região do MATOPIBA refletem o modelo de desenvolvimento agrícola caracterizado pela produção em larga escala de commodities para exportação. Os impactos dessas mudanças com a perda de aproximadamente 16 Mha de vegetação nativa (considerando formações florestais, savânicas e campestres) em menos de quatro décadas representa um desafio para a conservação do Cerrado, considerado um *hotspot*

de biodiversidade já ameaçado (Françoso *et al.*, 2015). Tal conversão poderá comprometer de forma irreversível os serviços ecossistêmicos, incluindo a regulação hídrica, estoque de carbono e manutenção da biodiversidade (Lahsen *et al.*, 2016; Strassburg *et al.*, 2017; Soterroni *et al.*, 2019).

Como mostra a Figura 9, no ano de 2023, a análise do uso e cobertura da terra revelou uma composição bem distinta daquela observada 37 anos antes (1985), com o avanço de área da soja, confirmando a dinâmica da atividade agrícola.

Foram adotados os marcos temporais de 1985, 1995, 2006, 2015, 2021 e 2023 para a análise da região do MATOPIBA (Figura 9). O ano de 1985 como a linha de base, por corresponder ao período em que o Cerrado se encontrava mais preservado na região. A análise avança para 1995, momento que são observados os primeiros sinais da expansão agrícola. O ano de 2006, por sua vez, representa o ponto alto do processo de conversão de terras, enquanto 2015 se destaca como o marco da consolidação institucional, com a criação do Plano de Desenvolvimento Agropecuário do MATOPIBA (PDA-Matopiba) (Pereira & Pauli, 2019). Por fim, o recorte temporal se encerra com os anos de 2021, com o pico mais recente de pressão ambiental e desmatamento, e 2023, que apresenta o cenário mais atual, consolidando quase quatro décadas de contínuas e profundas transformações na paisagem.

Figura 9 - Análise do Uso e Cobertura da terra entre 1985 e 2023 da região do MATOPIBA



Fonte: Elaboração própria com base nos dados do IBGE e MapBiomias (Coleção 9).

6.3.2 Transições do uso e cobertura da terra

Durante o período analisado (1985-2023), a região do MATOPIBA apresentou diversas transformações no uso e cobertura da terra, devido a intensificação agrícola sob as dinâmicas naturais de regeneração e degradação, podendo ser observadas na Tabela 14. As transições internas representaram a maior extensão de mudanças, totalizando 33,21 Mha, evidenciando transformações entre classes de um mesmo grupo, como conversões de diferentes tipos de vegetação natural ou modificações na tipologia do uso agropecuário. Este resultado destaca a heterogeneidade dos processos de mudança na região, onde não ocorrem apenas conversões simples de vegetação natural para agricultura, mas também rearranjos dentro de cada grande grupo de uso.

Tabela 14 – Mudanças de Uso e Cobertura da Terra no MATOPIBA (1985-2023)

Classes	Área (Mha)
Conversão de Vegetação Natural para Agropecuária / Área não Vegetada	18,03
Regeneração de Vegetação Natural	1,12
Ganho de Água	0,17
Perda de Água	0,11
Área Estável (sem transição)	20,52
Transições internas	33,21
Degradação do Solo	29,62 (ha)

Fonte: Elaboração de acordo com os dados do Projeto MapBiomias (Coleção 9).

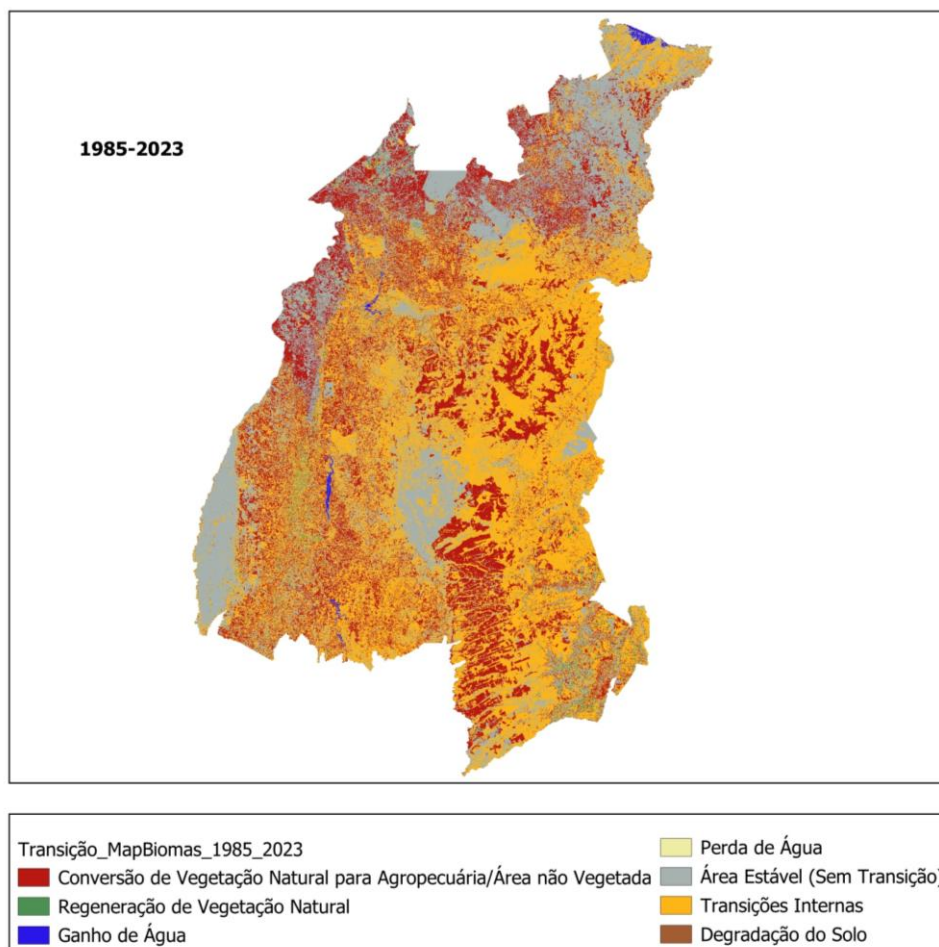
A conversão de vegetação natural para usos agropecuários e áreas não vegetadas totalizou 18,03 Mha, confirmando a expansão da fronteira agrícola como um dos principais fatores de transformação da paisagem na região do MATOPIBA. Este processo representa o desmatamento efetivo e a conversão de ecossistemas naturais para produção, alterando a composição e funcionalidade dos ambientes. Sobre os processos de regeneração de vegetação natural foram apenas 1,12 Mha, sugerindo capacidade limitada de recuperação em relação à taxa de conversão observada.

As mudanças relacionadas aos corpos d'água foram relativamente discretas, com ganho de 0,17 Mha e perda de 0,11 Mha, indicando dinâmicas hidrológicas pouco expressivas no período. Por outro lado, a degradação do solo registrou 29,62 ha como transição de áreas

com cobertura vegetal para solos expostos, sugerindo processos de possível degradação ambiental. A permanência de 20,52 Mha de áreas estáveis sem transição representa a manutenção de usos consolidados, particularmente áreas urbanas, infraestruturas estabelecidas e zonas onde a cobertura permaneceu inalterada.

Estes resultados revelam uma região em transformação, onde a expansão agrícola supera os processos de regeneração, caracterizando o MATOPIBA como uma das fronteiras de intensificação agrícola mais dinâmicas do país, espacialmente apresentadas na Figura 10.

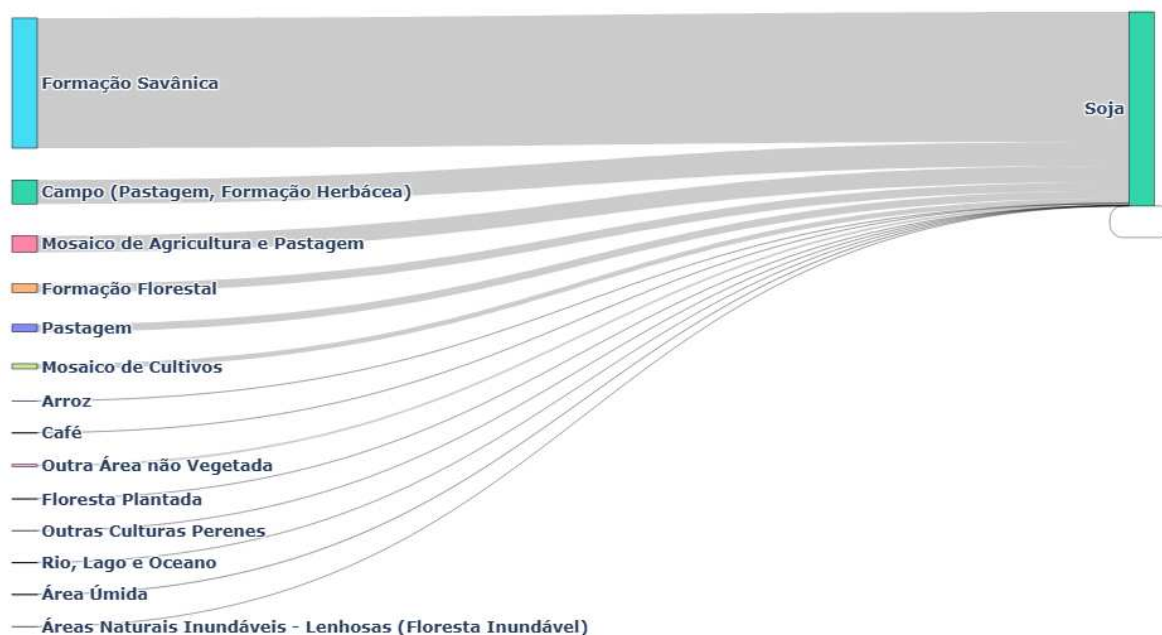
Figura 10 - Análise da Transição entre 1985-2023 da região do MATOPIBA



Fonte: Elaboração de acordo com os dados do Projeto MapBiomias (Coleção 9).

Quando analisadas especificamente as trajetórias de conversão para soja entre 1985 e 2023, observa-se um padrão das dinâmicas de substituição de usos na região, observadas no Gráfico 4. A Formação Savânica e o Campo (Pastagem e Formação Herbácea) constituem as principais fontes de expansão da soja, sugerindo que a conversão ocorreu primordialmente sobre ecossistemas naturais e áreas de pastagem extensiva preexistentes.

Gráfico 4 - Identificação das classes em 1985 que foram convertidas para o cultivo de soja em 2023.



Fonte: Elaboração de acordo com os dados do Projeto MapBiomias (Coleção 9).

Destacando que a incorporação de terras se deu pela conversão direta de vegetação nativa para cultivo mecanizado e a intensificação de áreas previamente ocupadas por pecuária de baixa produtividade (Polizel *et al.*, 2021; Caballero *et al.*, 2023; Melo, Picanço Júnior & Espindola, 2024). A contribuição de outras classes cultivadas (Mosaico de Cultivos, Outras Culturas Perenes, Arroz, Café) revela processos de substituição entre cultivos, onde a soja avançou sobre sistemas agrícolas já existentes, consolidando-se como a cultura dominante, confirmando que a soja é principal fator de transformação da paisagem do MATOPIBA no período analisado.

6.4 Conclusão

Os resultados demonstraram que a região passou por um processo de conversão de vegetação natural, especificamente Formação Savânica, que sofreu redução de 28%, e a classe de Formação Florestal, que diminuiu 27%, em favor de atividades agropecuárias, confirmando a região do MATOPIBA como uma das principais fronteiras de intensificação agrícola do Brasil. A expansão da soja apresentou uma área em 2023 de 4,70 Mha, cultura praticamente inexistente em 1985, refletindo sinergias entre políticas públicas, condições edafoclimáticas favoráveis, infraestrutura logística e oportunidades econômicas de mercado.

Concomitantemente, observou-se vulnerabilidade dos ecossistemas aquáticos e úmidos, destacando a fragilidade da legislação ambiental brasileira na proteção desses ambientes. A análise das transições revelou que a conversão de vegetação natural para usos agropecuários totalizou 18,03 Mha, enquanto os processos de regeneração permaneceram limitados, indicando desequilíbrio entre as taxas de degradação e recuperação.

Os resultados obtidos por meio do sensoriamento remoto e análise de séries temporais do MapBiomas confirmaram a efetividade dessa metodologia na identificação dos padrões de mudança. Concluiu-se que as transformações representam um desafio para a conservação do Cerrado, considerado um *hotspot* de biodiversidade, podendo comprometer de forma irreversível serviços ecossistêmicos essenciais como regulação hídrica, estoque de carbono e manutenção da diversidade biológica.

Tais achados ressaltam a necessidade de políticas integradas que conciliem desenvolvimento econômico com conservação ambiental, fortalecimento da legislação de proteção ambiental, e monitoramento contínuo das transformações paisagísticas, garantindo a sustentabilidade e a manutenção dos ecossistemas estratégicos para o equilíbrio climático regional e global.

7 CONCLUSÃO GERAL

A presente pesquisa teve como objetivo avaliar os impactos multidimensionais da produção de soja na região do MATOPIBA, analisando seus efeitos sobre a emissão de gases de efeito estufa, as mudanças no uso e cobertura da terra e as vulnerabilidades socioeconômicas locais. Por meio de uma abordagem metodológica diversificada, que integrou modelos *shift-share*, decomposição em componentes principais, redes neurais artificiais, análise fatorial e técnicas de sensoriamento remoto, foi possível compreender as transformações ocorridas na última fronteira agrícola brasileira entre 1985 e 2023.

Os principais achados da pesquisa destacam transformações territoriais e ambientais. A pesquisa iniciada pela análise da dinâmica produtiva e substituição de cultivos. Ao aplicar o modelo *shift-share* entre 1985 e 2022, identificou-se que o crescimento da soja foi induzido por expansão de área e ganhos tecnológicos. No entanto, a pesquisa demonstra que a soja avançou suprimindo áreas historicamente destinadas a culturas alimentares (arroz e mandioca) e vegetação nativa.

Essa alteração no uso da terra estabeleceu consequências atmosféricas, analisadas no capítulo referente aos impactos sobre as emissões de gases de efeito estufa. Constatou-se que 70,3% dos municípios da região (237 de 337) apresentaram aumento nas emissões entre 2006 e 2017, revelando a insustentabilidade ambiental do modelo produtivo predominante.

O reflexo social dessa dinâmica excludente, que se inicia pela perda das lavouras de subsistência identificada na etapa produtiva, é a persistência das fragilidades locais, comprovada pelo Índice de Vulnerabilidade (IVI_MATOPIBA) apresentando 45,37%, com diferenças entre os estados, destacando-se o Maranhão com o índice mais elevado (52,31%), o que evidencia que os ganhos econômicos pela expansão agrícola não se traduziram em desenvolvimento econômico.

Por fim, a materialização espacial da transição foi apresentada no último capítulo. A análise geoespacial comprovou que expansão da soja resultou na conversão de 18,03 milhões de hectares de vegetação natural para agropecuária, com a cultura ocupando 4,70 milhões de hectares, processo que ocorreu tanto sobre áreas de vegetação nativa do Cerrado quanto sobre áreas anteriormente destinadas a cultivos alimentares tradicionais.

A principal contribuição original desta pesquisa reside na análise multidimensional dos impactos da expansão da soja no MATOPIBA, bem como a utilização de metodologias híbridas, combinando modelos lineares e não lineares para análise das emissões de GEE, representando um avanço para estudos de impacto ambiental em sistemas agrícolas. Além disso,

a construção do Índice de Vulnerabilidade para a região (IVI_MATOPIBA) e sua decomposição por estados com base no trabalho de Lemos (2020) possibilitou avaliar as desigualdades socioeconômicas na fronteira agrícola.

A pesquisa também fornece uma análise de uma série temporal de longo prazo (1985-2023) das mudanças de uso e cobertura da terra, por meio dos dados do MapBiomass, permitindo compreender os processos de ocupação territorial.

Apesar das contribuições apresentadas, a pesquisa possui limitações, devido ao uso exclusivo de dados secundários, embora sejam realizadas análises em escala temporal e espacial, o estudo não traz as percepções diretas dos atores sociais.

A sugestão para trabalhos futuros é a inserção de métodos qualitativos, como estudos de caso em municípios representativos dos diferentes perfis identificados, que possam permitir compreender as percepções dos agricultores familiares, comunidades tradicionais e agentes do agronegócio às mudanças territoriais.

REFERÊNCIAS

- ACHARD, Frédéric *et al.* Determination of tropical deforestation rates and related carbon losses from 1990 to 2010. **Global Change Biology**, Maryland, v. 20, n. 8, p. 2540-2554, 2014.
- AGATONOVIC-KUŠTRIN, Snežana; BERESFORD, Rosemary. Basic concepts of artificial neural network (ANN) modeling and its application in pharmaceutical research. **Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis**, Maryland, v. 22, n. 5, p. 717–727, 2000.
- AGOSTINHO, Feni *et al.* Sustainability dynamics of the Brazilian MATOPIBA region between 1990-2018: Impacts of agribusiness expansion. **Applied Geography**, Sevenoaks, v. 159, p. 1-14, 2023.
- AGUIAR, Ana Paula Dutra *et al.* Land use change emission scenarios: Anticipating a forest transition process in the Brazilian Amazon. **Global Change Biology**, Maryland, v. 22, n. 5, p. 1821–1840, 2016.
- ALTIERI, Miguel A. Agroecology, Small Farms, and Food Sovereignty. **Monthly Review**, New York, v. 61, n. 3, p. 102-113, 2009.
- ALVARES, Clayton Alcarde *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, p. 711-728, 2013.
- ALVES, Eliseu; SOUZA, Geraldo da Silva e; MIRANDA, Evaristo Eduardo de. Renda e pobreza rural na região do MATOPIBA. Campinas, SP: Embrapa, 2015.
- ALVES, Vicente Eudes Lemos. Expansão do Agronegócio e os Impactos Socioambientais na Região de Cerrados do Centro-Norte do Brasil (MATOPIBA). **Confins**, Paris, n. 45, p. 1-15, 2020.
- ANDERSON, Martha *et al.* The evaporative stress index as an indicator of agricultural drought in Brazil: An assessment based on crop yield impacts. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 174, p. 82–99, 2016.
- ANDRADE, Victoria Soledad *et al.* Influence of rainfall and seasonal crop practices on nutrient and pesticide runoff from soybean dominated agricultural areas in Pampean streams, Argentina. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 788, p. 1-10, 2021.
- ARAÚJO, Mayara Lucyanne Santos de *et al.* The Relationship between Climate, Agriculture and Land Cover in Matopiba, Brazil (1985–2020). **Sustainability**, Basel, v. 16, n. 7, p. 1-22, 2024.
- ARAÚJO, Mayara Lucyanne Santos de *et al.* Spatiotemporal dynamics of soybean crop in the Matopiba region, Brazil (1990–2015). **Land Use Policy**, Amsterdam, v. 80, p. 57-67, 2019.
- ARRUDA, Vera Laísa da Silva *et al.* Assessing four decades of fire behavior dynamics in the Cerrado biome (1985 to 2022). **Fire Ecology**, New York, v. 20, n. 64, p. 1-20, 2024.

ARTIGE, Lionel; NEUSS, Leif Van. A New Shift-Share Method. **Growth and Change**, Malden, v. 45, n. 4, p. 667-683, 2014.

AZEVEDO, Andrea. A. *et al.* Limits of Brazil's Forest Code as a means to end illegal deforestation. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, v. 114, n. 29, p. 7653-7658, jul. 2017.

BANDARA, Ananda. Y. *et al.* Dissecting the economic impact of soybean diseases in the United States over two decades. **PLoS ONE**, San Francisco, v. 15, n. 4, p. 1-28, 2020.

BARBOSA, Leovânio Rodrigues *et al.* Physical-hydraulic properties of an ultisol under no-tillage and crop-livestock integration in the Cerrado. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 35, n. 2, p. 460-469, 2022.

BATISTA, Maria Larissa Bezerra *et al.* Análise fatorial e espacial da modernização agrícola no MATOPIBA. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v. 61, n. 3, p. 1-21, 2023.

BATISTELLA, Mateus. (org.). **Relatório do diagnóstico do macrozoneamento ecológico-econômico do Estado do Maranhão**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite; São Luís: Embrapa Cocais, 2013. 445 p. il. (Relatório Técnico / Embrapa Monitoramento por Satélite, produto 3, v. 1).

BECKER, Gary. S. **Human Capital: A theoretical and empirical analysis, with special reference to education**, New York: Columbia University Press, 1975.

BELCHIOR, Ernandes Barboza; ALCANTARA, Pedro Henrique Rezende; BARBOSA, Cláudio França. **Perspectivas e desafios para a região do Matopiba**. Palmas, TO: Embrapa Pesca e Aquicultura, 2017.

BERNARDES, Júlia Adão. Novas fronteiras do capital no Cerrado: dinâmica e contradições da expansão do agronegócio na região Centro-Oeste, Brasil. **Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales**. Barcelona, v. 19, n. 507, p. 1-28, 2015.

BEZERRA, Filomena Nádia Rodrigues. Avaliação da agricultura de baixa emissão de carbono e inteligente ao clima no Brasil. 2022. 263 f. Tese (Doutorado em Economia Rural) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

BOECHAT, Cássio Arruda *et al.* Transformations of the Agricultural Frontier in Matopiba: From State Planning to the Financialisation of Land, **IDS Bulletin**, Brighton, v. 54, n. 1, p.17-32, 2023.

BOLAÑOS, Omaira. Redefining identities, redefining landscapes: indigenous identity and land rights struggles in the Brazilian Amazon. **Journal of Cultural Geography**, Abingdon, v. 28, n. 1, p. 45-72, 2011.

BOLFE, Édson L.; *et al.* Matopiba em crescimento agrícola Aspectos territoriais e socioeconômicos. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, v. 25, n. 4, p. 38-62, 2016.

BONETTI, João de Andrade; FINK, Jessé Rodrigo. **Manejo e conservação da água e do solo**. Lavras: UFLA, 2020. 151p.

BONINI, Isabelle *et al.* Collapse of ecosystem carbon stocks due to forest conversion to soybean plantations at the Amazon-Cerrado transition. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 414, p.64-73, 2018.

BORGES, Larissa Rolim; NOVA, Meiriana Xavier Vila. Associação de inseticidas químicos e fungos entomopatogênicos no Manejo Integrado de Pragas – uma revisão. **Revista Ambiência**, Guarapuava, v. 7, n. 1, p.179-190, 2011.

BORTOLON, Leandro. *et al.* **Obtenção de altas produtividades em sistemas agrícolas**. Palmas: Embrapa Pesca e Aquicultura, 2016.

BOSIO, Beatriz González de. Pedro Nicolás Ciancio y la soja en el Paraguai. **Revista Estudios Paraguayos**, Asunción, v. 31-32, n. 1-2, p. 85-104, 2015.

BOTTA, Giulia. *et al.* Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (*Glycine max L.*) yields in Argentinean pampas. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 110, n. 1, p. 167–174, 2010.

BOTTINELLI, Nicolas. *et al.* Impact of heavy traffic on soil macroporosity of two silty forest soils: Initial effect and short-term recovery. **Geoderma**, Amsterdam, v. 217–218, p. 10–17, 2014.

BOX, George Edward Pelham; JENKINS, Gwilym Meirion. **Time series analysis: Forecasting and control**. San Francisco, CA: Holden-Day, 1976. 575p.

BRAGANÇA, Arthur. The economic consequences of the agricultural expansion in Matopiba. **Revista Brasileira de Economia**, Rio de Janeiro, v. 72, n. 2, p. 161–185, 2018.

BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa Código Florestal. Brasília, DF: Presidência da República, 2012. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm. Acesso em: 15 abr. 2022.

BRASIL. **Decreto nº 8.447, de 6 de maio de 2015**. Dispõe sobre o Plano de Desenvolvimento Agropecuário do Matopiba e a criação de seu Comitê Gestor. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 2, 7 maio 2015. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?jornal=1&pagina=2&data=07/05/2015>. Acesso em: 12 abr. 2022.

BRASIL. **Lei de diretrizes e bases da educação nacional**. 2. ed. Brasília: Senado Federal, Coordenação de Edições Técnicas, 2018. 58 p.

BRITO, Lucélia de Cássia Rodrigues de *et al.* Improved soil fertility, plant nutrition and grain yield of soybean and millet following maize intercropped with forage grasses and crotalaria in the Brazilian savanna. **Crop and Pasture Science**, Clayton, v. 74, n. 5, p.438 – 448, 2023.

BROCK, Rebecca Catherine *et al.* Implementing Brazil's Forest Code: a vital contribution to securing forests and conserving biodiversity. **Biodiversity and Conservation**, Dordrecht, v. 30, p.1621-1635, 2021.

BUAINAIN, Antônio Márcio; GARCIA, Junior Ruiz. Crescimento da agricultura no cerrado nordestino: fatores condicionantes, limites e resultados socioeconômicos. *In*: VIEIRA FILHO, José Eustáquio Ribeiro; GASQUES, José Garcia (org.). **Agricultura, transformação produtiva e sustentabilidade**. Brasília: Ipea, 2016. p. 109-142.

BÜHLER, Ève-Anne; OLIVEIRA, Valter Lúcio de. Néolibéralisation de la nature sur la frontière agricole du Cerrado nordestin, **Brésil(s)**, Paris, v. 13, 2018.

BUZATO, Heidi Cristina *et al.* **A soja no Matopiba**: contradições do modelo de desenvolvimento, riscos e perspectivas para a conservação do Cerrado. Piracicaba: Imaflora, 2018. 26 p. (Série Sustentabilidade em Debate, n. 6).

CABALLERO, Cassia Brocca *et al.* Transformation of Brazil's biomes: The dynamics and fate of agriculture and pasture expansion into native vegetation. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 896, p. 1-15, 2023.

CADENAZZI, Guillermo. La historia de la soja en Argentina: de los inicios al boom de los '90. *In*: CONGRESO DE LA ASOCIACIÓN LATINOAMERICANA DE SOCIOLOGÍA, 27., 2009, Buenos Aires. **Anais...** Buenos Aires: ALAS, 2009.

CAMATTA, Adriana Freitas Antunes; MACIEL, Gabriela Coury Correia da Rocha; MIRANDA, Rafaela Hidalgo González Franco de Carvalho. Desigualdades regionais brasileiras no acesso ao saneamento básico e suas consequências no desenvolvimento humano e no desequilíbrio socioambiental. **Revista de Direito, Política e Filosofia - Athenas**, Vitória, v. 1, p. 293-318, 2022.

CARVALHO, João Luis Nunes *et al.* Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 277-289, 2010.

CATTELAN, Alexandre José; DALL'AGNOL, Amélio. The rapid soybean growth in Brazil. **Oilseeds and fats, Crops and Lipids - OCL**, Les Ulis, v. 25, n. 1, p.1-12, 2018.

CHAMEN, W. C. Tim. *et al.* Mitigating arable soil compaction: A review and analysis of available cost and benefit data. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 146, p. 10-25, 2015.

COE, Michael T. *et al.* The Forests of the Amazon and Cerrado Moderate Regional Climate and Are the Key to the Future. **Tropical Conservation Science**, Thousand Oaks, v. 10, p. 1-6, 2017.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**: safra 2024/25: 1º levantamento. Brasília: Conab, v. 12, n. 1, out. 2024. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 20 jan. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**: safra 2020/21: 10º levantamento. Brasília: Conab, v. 8, n. 10, jul. 2021. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 20 jan. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**: safra 2021/22: 10º levantamento. Brasília: Conab, v. 9, n. 10, jul. 2022. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 20 jan. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**: safra 2023/24: 11º levantamento. Brasília: Conab, v. 11, n. 11, ago. 2024. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 20 jan. 2025.

CORDEIRO, Luiz Adriano Maia *et al.* Integração lavoura-pecuária e integração lavoura-pecuária-floresta: estratégias para intensificação sustentável do uso do solo. **Cadernos de Ciências & Tecnologia**, Brasília, v. 32, n. 1/2, p. 15-43, 2015.

CREAMER, Daniel. Shifts of manufacturing industries. *In*: ESTADOS UNIDOS. National Resources Planning Board. **Industrial location and natural resources**. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 1943. cap. 4, p. 85-104.

D'ANGELIS FILHO, João Silveira; DAYRELL, Carlos Alberto. Ataque aos cerrados: a saga dos geraizeiros que insistem em defender o seu lugar. **Cadernos do CEAS: Revista crítica de humanidades**, Salvador, n. 222, p. 10-33, 2006.

DALL'AGNOL Amelio. **A Embrapa Soja no contexto do desenvolvimento da soja no Brasil**: histórico e contribuições. Brasília, DF: EMBRAPA, 2016. 71p.

DAO, Dong Van *et al.* A sensitivity and robustness analysis of GPR and ANN for high-performance concrete compressive strength prediction using a Monte Carlo simulation. **Sustainability**, Basel, v. 12, n. 3, p. 1-22, 2020.

DOLIJANOVIĆ, Željko *et al.* Dependence of the productivity of maize and soybean intercropping systems on hybrid type and plant arrangement pattern. **Genetika**, Belgrado, v. 45, p. 135-144, 2013.

DUFFY, Philip B. *et al.* Projections of future meteorological drought and wet periods in the Amazon. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, v. 112, n. 43, p. 13172–13177, 2015.

DUNN, Edgar S. A statistical and analytical technique for regional analysis. **Papers in Regional Science**, Philadelphia, v. 6, n. 1, p. 97-112, 1960.

DURIGAN, Giselda *et al.* Cerrado wetlands: multiple ecosystems deserving legal protection as a unique and irreplaceable treasure. **Perspectives in Ecology and Conservation**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 3, p. 185-196, 2022.

ELOY, Ludivine *et al.* On the margins of soy farms: traditional populations and selective environmental policies in the Brazilian Cerrado. **The Journal of Peasant Studies**, London, v. 43, n. 2, p. 494-516, 2015.

ELSARAITI, Meftah. Short-term power consumption forecasting using neural networks with first- and second-order differencing. **Academia Green Energy**, San Francisco, v. 1, n. 3, 2024.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Soja em números**. Londrina: Embrapa Soja, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>. Acesso em: 15 mar. 2022.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sobre a Embrapa**. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/sobre-a-embrapa>. Acesso em: 17 out. 2024.

ESPÍNDOLA, Carlos José; CUNHA, Roberto César Costa. A dinâmica geoeconômica recente da cadeia produtiva da soja no Brasil e no mundo. **GeoTextos**, Salvador, v. 11, n. 1, p. 217-238, 2015.

ESPÍNDOLA, Giovana Mira de *et al.* Cropland expansion as a driver of land-use change: the case of Cerrado-Caatinga transition zone in Brazil. **Environment, Development and Sustainability**, Dordrecht, v. 23, p.17146–17160, 2021.

FAVARETO, Arilson *et al.* Há mais pobreza e desigualdade do que bem-estar e riqueza nos municípios do Matopiba. **Revista Nera**, Presidente Prudente, v. 22, n. 47, p. 348-381, 2019.

FÁVERO, Luiz Paulo; BELFIORE, Patrícia. **Manual de análise de dados**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

FEARNSIDE, Philip M. Soybean cultivation as a threat to the environment in Brazil. **Environmental Conservation**, Cambridge, v. 28, n. 1, p.23 – 38, 2001.

FEITOSA, Milena Monteiro *et al.* A soja no estado do Maranhão, Brasil: uma análise temporal da expansão e substituição das culturas alimentares. **Geografares**, Vitória, v. 3, n. 37, p. 114–131, 2023.

FELÍCIO, Ricardo Augusto. Mudanças climáticas e aquecimento global – Nova formatação e paradigma para o pensamento contemporâneo? **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 257–266, 2014.

FERNEDA, Brena Geliane *et al.* Graus-dias na estimativa das taxas de crescimento de quatro cultivares de soja em diferentes épocas de plantio. **Nativa**, Sinop, v. 4, n. 3, p.121-127, 2016.

FERRAZ-ALMEIDA, Risely; MOTA, Raquel Pinheiro da. Routes of Soil Uses and Conversions with the Main Crops in Brazilian Cerrado: A Scenario from 2000 to 2020. **Land**, Basel, v. 10, n. 11, 2021.

FERREIRA, Edinaiane Carneiro. Conexão cerrado: MATOPIBA e seus impactos ambientais. **Journal of Interdisciplinary Debates**, Buriticupu, v. 4, n. 3, p.39-45, 2023.

FERREIRA, Marjorie Angélica Sabioni; TEIXEIRA, Erly Cardoso; SOUZA, Manoella Cabral de. Determinantes da receita de exportação brasileira de açúcar e álcool. **Revista de Economia Agrícola**, São Paulo, v. 56, n. 2, p. 47-59, 2009.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS. **Índice Geral de Preços - Disponibilidade Interna (IGP-DI)**. Rio de Janeiro: IBRE, 2023. Disponível em: <https://portalibre.fgv.br/igp>. Acesso em: 10 jul. 2023.

FLACH, Rafaela *et al.* Conserving the Cerrado and Amazon biomes of Brazil protects the soy economy from damaging warming. **World Development**, Oxford, v. 146, 2021.

FORSTER, Piers *et al.* Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. *In*: SOLOMON, S. *et al.* (ed.). **Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. cap. 2, p. 131-234.

FRANÇOSO, Renata D. *et al.* Habitat loss and the effectiveness of protected areas in the Cerrado Biodiversity Hotspot. **Natureza & Conservação**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 1, p. 35-40, 2015.

FREITAS, Rogério Edivaldo. Brazil's agricultural expansion: Main crops in Matopiba. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, n. 1, p. 70-85, 2022.

GALE, Fred; VALDES, Constanza; ASH, Mark. **Interdependence of China, United States, and Brazil in soybean trade**. Washington, DC: USDA, Economic Research Service, 2019. (Outlook for U.S. Agricultural Trade: Oil Crops, OCS-19F-01).

GALVÁN, Gabriel Horacio; RIBEIRO, Dinalva Donizete. Impactos da cultura da soja no êxodo rural na Argentina (1990-2017). **Revista NERA**, Presidente Prudente, v. 23, n. 55, p. 383-401, 2020.

GARCÍA-LÓPEZ, Gustavo A.; ARIZPE, Nancy. Participatory processes in the soy conflicts in Paraguay and Argentina. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 70, n. 2, p. 196–206, 2010.

GARRETT, Rachael D.; LAMBIN, Eric F.; NAYLOR, Rosamond L. Land institutions and supply chain configurations as determinants of soybean planted area and yields in Brazil. **Land Use Policy**, Oxford, v. 31, p. 385-396, 2013.

GASPARINETTI, Pedro; BAKKER, Leonardo. **Incentivos à produção de soja sustentável em Matopiba**. Rio de Janeiro: Conservação Internacional Brasil, 2020. (Caderno de Notas Técnicas do Programa Parceria para o Bom Desenvolvimento – GGP/PNUD).

GASPARRI, Nestor Ignacio; GRAU, Héctor Ricardo; GUTIÉRREZ ANGONESE, Jorgelina. Linkages between soybean and neotropical deforestation: Coupling and transient decoupling dynamics in a multi-decadal analysis. **Global Environmental Change**, Oxford, v. 23, n. 6, p. 1605-1614, 2013.

GASPARRI, Nestor Ignacio *et al.* The Emerging Soybean Production Frontier in Southern Africa: Conservation Challenges and the Role of South-South Telecouplings. **Conservation Letters**, Hoboken, v. 9, n. 1, p.21-31, 2016.

GASPARRI, Nestor Ignacio; WAROUX, Yann le Polain de. The Coupling of South American Soybean and Cattle Production Frontiers: New Challenges for Conservation Policy and Land Change Science. **Conservation Letters**, Hoboken, v. 8, n. 4, p.290-298, 2015.

GAZZONI, Decio Luiz; DALL'AGNOL, Amelio. **A saga da soja: de 1050 a.C. a 2050 d.C.** Brasília, DF: Embrapa, 2018. 199p.

GEMAN, Hélyette; NGUYEN, Vu-Nhat. Soybean Inventory and Forward Curve Dynamics. **Management Science**, Catonsville, v. 51, n. 7, p.1076-1091, 2005.

GIBBS, Holly K. *et al.* Tropical forests were the primary sources of new agricultural land in the 1980s and 1990s. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 107, n. 38, p. 16732-16737, 2010.

GIRAUDO, Maria Eugenia. Dependent development in South America: China and the soybean nexus. **Journal of Agrarian Change**, Oxford, v. 20, n. 1, p. 60–78, 2019.

GOLDSMITH, Peter. The Faustian Bargain of Tropical Soybean Production. **Tropical Conservation Science**, Thousand Oaks, v. 10, 2017.

GOWARD, Samuel N.; WILLIAMS, Darrel L. Landsat and earth system science: development of terrestrial monitoring. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 63, p. 887-900, 1997.

GUARENGHI, Marjorie Mendes, *et al.* Areas Available for the Potential Sustainable Expansion of Soy in Brazil: A Geospatial Assessment Using the SAFmaps Database. **Remote Sensing**, Basel, v. 14, n. 7, 2022.

HAESBAERT, Rogério. Des-territorialização e identidade: a rede “gaúcha” no Nordeste. Niterói: EDUFF, 1997. 293 p.

HAIR JR., Joseph F. *et al.* **Análise multivariada de dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

HANSEN, M. C. *et al.* High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. **Science**, v. 342, p. 850-853, 2013.

HARDING, Torfinn; HERZBERG, Julika; KURALBAYEVA, Karlygash. Commodity prices and robust environmental regulation: Evidence from deforestation in Brazil. **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 108, p. 1-20, 2021.

HECK, Egon; MENEZES, Laila. Matopiba: projeto de destruição do Cerrado. **Porantim**, Brasília, ano 37, n. 382, p. 8-9, jan./fev. 2016. Disponível em: https://cimi.org.br/pub/Porantim/2016/Porantim382_JanFev2016.pdf. Acesso em: 17 mar. 2022.

HERSHAW, Eva; SAUER, Sérgio. Land and investment dynamics along Brazil’s ‘final’ frontier: The financialization of the Matopiba at a political crossroads. **Land Use Policy**, Amsterdam, v. 131, p. 1-15, 2023.

HOPPE, R. Bradley. Regional versus Industrial Shift-Share Analysis - With Help from the Lotus Spreadsheet. **Economic Development Quarterly**, Thousand Oaks, v. 5, n. 3, p.258-267, 1991.

HORVAT, Renata; WATANABE, Melissa; YAMAGUCHI, Cristina Keiko. Fertilizer Consumption in the Region MATOPIBA and Their Reflections on Brazilian Soybean Production. **International Journal of Agriculture and Forestry**, Rosemead, v. 5, n. 1, p.52-59, 2015.

HOUGHTON, R. A. *et al.* Carbon emissions from land use and land-cover change. **Biogeosciences**, Göttingen, v. 9, p. 5125–5142, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção Agrícola Municipal (PAM)**. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>. Acesso em: 5 jan. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção Agrícola Municipal (PAM)**. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>. Acesso em: 25 jan. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Terra Brasilis: biomes: cerrado: increments**. São José dos Campos, 2024. Disponível em: <https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/>. Acesso em: 9 jun. 2024.

JAMET, Jean-Paul; CHAUMET, Jean-Marc. Soybean in China: Adapting to the liberalization. **OCL - Oilseeds and fats, Crops and Lipids**, v. 23, n. 6, p. 1-9, 2016.

JOHNSON, Richard A.; WICHERN, Dean W. **Applied multivariate statistical analysis**. 6. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2007.

KAISER, Henry F. An index of factorial simplicity. **Psychometrika**, Berkeley, v. 39, n. 1, p. 31–36, 1974.

KIM, Dong-Gill; KIRSCHBAUM, Miko Uwe Franz. The effect of land-use change on the net exchange rates of greenhouse gases: A compilation of estimates. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 208, p. 114–126, 2015.

KIRSCHBAUM, Miko Uwe Franz. *et al.* Comprehensive evaluation of the climate-change implications of shifting land use between forest and grassland: New Zealand as a case study. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 150, p. 123–138, 2012.

KIST, Benno Bernardo *et al.* **Anuário brasileiro da soja 2023**. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2023. 102p.

KLINK, Carlos A.; MACHADO, Ricardo B. Conservation of the Brazilian Cerrado. **Conservation biology**, Malden, v.19, n.3, p.707-713, 2005.

KLINK, Carlos A. *et al.* The Role of Vegetation on the Dynamics of Water and Fire in the Cerrado Ecosystems: Implications for Management and Conservation. **Plants**, Basel, v. 9, n. 12, 2020.

- KNUDSEN, Daniel C.; BARFF, Richard. Shift-Share Analysis as a Linear Model. **Environment and Planning A: Economy and Space**, London, v. 23, n. 3, p. 421–431, 1991.
- KOCHHANN, Rainoldo Alberto; DENARDIN, José Eloir. **Implantação e Manejo do Sistema Plantio Direto**. Passo Fundo: EMBRAPA Trigo, 2000. 36p.
- KÖPPEN, Graz. W. **Das geographische System der Klimate, Handbuch der Klimatologie**. Berlin: Borntraeger, 1936. 44p.
- KUMAR, Sandeep *et al.* Remote sensing for agriculture and resource management. *In: JHARIYA, M. K. et al. (ed.). Natural resources conservation and advances for sustainability*. Amsterdam: Elsevier, 2022. p. 91–135.
- LAHSEN, Myanna; BUSTAMANTE, Mercedes M. C.; DALLA-NORA, Eloi L. Undervaluing and overexploiting the Brazilian Cerrado at our peril. **Environment: Science and Policy for Sustainable Development**, Philadelphia, v. 58, n. 6, p. 4-15, 2016.
- LANGTHALER, Ernst. Broadening and Deepening: Soy Expansions in a World-Historical Perspective. **Historia Ambiental Latinoamericana y Caribeña (HALAC)**, Belo Horizonte, v. 10, n. 1, p. 244-277, 2020.
- LATHUILLIÈRE, Michael J. *et al.* Environmental footprints show China and Europe's evolving resource appropriation for soybean production in Mato Grosso, Brazil. **Environmental Research Letters**, Bristol, v. 9, n. 7, p. 1-13, 2014.
- LEE, June-Goo *et al.* Deep learning in medical imaging: General overview. **Korean Journal of Radiology**, Seoul, v. 18, n. 4, p. 570–584, 2017.
- LEMOS, José de Jesus Sousa. Efeitos da expansão da soja na resiliência da agricultura familiar no Maranhão. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, v. 24, n. 2, p. 17-25, 2015.
- LEMOS, José de Jesus Sousa. **Vulnerabilidades induzidas no semiárido**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2020.
- LEMOS, Vicente Eudes. Globalización y reestructuración productiva agropecuaria en el Bioma de Cerrados del Centro- Norte de Brasil (Matopiba). **Revista Austral de Ciencias Sociales**, Valdivia, n. 38, p. 291-311, 2020.
- LIMA, Mendelson *et al.* Demystifying sustainable soy in Brazil. **Land Use Policy**, Oxford, v. 82, p. 349–352, 2019.
- LIN, Meimei; HENRY, Mary C. Grassland and Wheat Loss Affected by Corn and Soybean Expansion in the Midwest Corn Belt Region, 2006–2013. **Sustainability**, Basel, v. 8, n. 11, p1-18, 2016.
- LIU, Han; COCEA, Mihaela. Semi-random partitioning of data into training and test sets in granular computing context. **Granular Computing**, Cham, v. 2, p. 357–386, 2017.
- LIU, Xuyi; ZHANG, Shun; BAE, Junghan. The nexus of renewable energy-agriculture-environment in BRICS. **Applied Energy**, Oxford, v. 204, p. 489–496, 2017.

LMC INTERNATIONAL. **The economic impact of U.S. soybeans and end products on the U.S. economy**. Oxford: LMC International, 2019. 31 p.

LOCATELLI, Jorge L.; SANTOS, Rafael S.; CHERUBIN, Maurício R.; CERRI, Carlos E. P. Changes in soil organic matter fractions induced by cropland and pasture expansion in Brazil's new agricultural frontier. **Geoderma Regional**, Amsterdam, v. 28, p. 1-11, 2022.

LOPES, Gabriela Russo; LIMA, Mairon G. Bastos; REIS, Tiago N.P. dos. Maldevelopment revisited: Inclusiveness and social impacts of soy expansion over Brazil's Cerrado in Matopiba. **World Development**, Oxford, v. 139, p. 1-17, 2021.

LOVELAND, Thomas R.; MERCHANT, James W.; OHLEN, Donald O.; BROWN, Jesslyn F. Development of a land-cover characteristics database for the conterminous United-States. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 57, n. 11, p. 1453-1463, 1991.

LOVERIDGE, Scott; SELTING, Anne C. A Review and Comparison of Shift-Share Identities. **International Regional Science Review**, Thousand Oaks, v. 21, n. 1, p.37-58, 1998.

LUMBRERAS, José Francisco *et al.* **Aptidão Agrícola das Terras do Matopiba**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2015. 49p.

LV, Donghui; GAO, Huiying; ZHANG, Yu. Rural Economic Development Based on Shift-Share Analysis in a Developing Country: A Case Study in Heilongjiang Province, China. **Sustainability**, Basel, v.13, n. 4, p. 1-17, 2021.

MAGGI, Federico; TANG, Fiona H. M. Estimated decline in global earthworm population size caused by pesticide residue in soil. **Soil Security**, Amsterdam, v. 5, p. 1-9, 2021.

MANTOVANI, Evandro Chartuni *et al.* Current Status and Future Prospect of the Agricultural Mechanization in Brazil. **Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America**, Tokyo, v. 50, n. 2, p. 20-28, 2019.

MAPBIOMAS. **Coleção 9 da série anual de mapas de cobertura e uso da terra do Brasil**. São Paulo, 2024. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org>. Acesso em: 12 jan. 2024.

MAPBIOMAS. **Coleção 3 da série anual de mapas de cicatrizes de fogo no Brasil (1985-2023)**. São Paulo, 2024. Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/hotsite-fogo>. Acesso em: 28 out. 2024.

MAPBIOMAS. **Relatório anual de desmatamento 2023**. São Paulo: MapBiomas, 2023. 154 p. Disponível em: <https://alerta.mapbiomas.org>. Acesso em: 15 maio 2024.

MAPBIOMAS. **Coleções MapBiomas**. São Paulo, 2024. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org>. Acesso em: 9 jul. 2024.

MARANHÃO, Rebecca Lima Albuquerque *et al.* The Spatiotemporal Dynamics of Soybean and Cattle Production in Brazil. **Sustainability**, Basel, v. 11, n. 7, p. 1-13, 2019.

- MARENGO, José A. *et al.* Increased climate pressure on the agricultural frontier in the Eastern Amazonia – Cerrado transition zone. **Scientific Reports**, London, v. 12, n. 457, p. 1-10, 2022.
- MARKUSEN, Ann R.; NOPONEN, Helzi; DRIESSEN, Karl. International Trade, Productivity, and U.S. Regional Job Growth: A Shift-Share Interpretation. **International Regional Science Review**, Thousand Oaks, v.14, n. 1, p. 15-39, 1991.
- MARTINELLI, Luiz Antonio *et al.* Soy Expansion and Socioeconomic Development in Municipalities of Brazil. **Land**, Basel, v. 6, n. 3, p. 1-14, 2017.
- MARTINELLI, Luiz A. Agriculture in Brazil: impacts, costs, and opportunities for a sustainable future. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, Amsterdam, v. 2, n. 5-6, p. 431-438, 2010.
- MASUDA, Tadayoshi; GOLDSMITH, Peter D. World Soybean Production: Area Harvested, Yield, and Long-Term Projections. **International Food and Agribusiness Management Review**, Wageningen, v. 12, n. 4, p. 143-162, 2009.
- MATRICARDI, Eraldo Aparecido Trondoli; AGUIAR, Adriano Saraiva; MIGUEL, Eder Pereira; ANGELO, Humberto; GASPAR, Ricardo de Oliveira. Modelagem do desmatamento na região do MATOPIBA. **Nativa**, Sinop, v. 6, n. 2, p. 198-206, 2018.
- MATSUO, Éder *et al.* Estimates of the genetic parameters, optimum sample size and conversion of quantitative data in multiple categories for soybean genotypes. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 34, n. 3, p. 265-273, 2012.
- MELO, Lineardo Ferreira de Sampaio; PICANÇO JÚNIOR, Pérciles Luiz; ESPINDOLA, Giovana Mira de. Analysis of burns and deforestation resulting from agricultural practices in the Matopiba region: case study in the municipalities of Piauí. **Observatorio de la Economía Latinoamericana**, Málaga, v. 22, n. 2, p. 1-23, 2024.
- MIRANDA, Evaristo Eduardo de; MAGALHÃES, Luciola Alves; CARVALHO, Carlos Alberto de. **Proposta de delimitação territorial do MATOPIBA**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2014. 18p. (Nota Técnica GITE, 1).
- MIRANDA, I. N. Gómez; JARAMILLO, J. M. Fernández; PEÑUELA, G. A. Hybrid multivariate statistical and neural network model to predict greenhouse gas emissions. **Arabian Journal for Science and Engineering**, Heidelberg, v. 46, n. 10, p. 10113-10123, 2021.
- MORAES, Bergson Cavalcanti *et al.* Variação temporal da seca na região produtora de soja de Matopiba. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 17, n. 4, p. 2671-2683, 2024.
- MOURA NETO, Arão de *et al.* Changes in land use and cover and their consequences on the spatial distribution of evapotranspiration and climatic elements in southwest Piauí, MATOPIBA. **Journal of South American Earth Sciences**, Amsterdam, v. 120, p. 1-12, 2022.

- MYERS, Norman *et al.* Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, London, v. 403, n. 6772, p. 853-857, 2000.
- MYHRE, Gunnar *et al.* Anthropogenic and natural radiative forcing. *In*: STOCKER, T. F. *et al.* (ed.). **Climate change 2013: the physical science basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. p. 659-740. (Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change).
- NEHRING, Ryan. Yield of dreams: Marching west and the politics of scientific knowledge in the Brazilian Agricultural Research Corporation (Embrapa). **Geoforum**, Oxford, v. 77, p. 206–217, 2016.
- NEPOMOCENO, Taiane Aparecida Ribeiro; CARNIATTO, Irene. A nova fronteira agrícola do Brasil: um ensaio teórico sobre a insustentabilidade na região do Matopiba. **Revista Cerrados**, Montes Claros, v. 20, n. 1, p. 95-119, 2022.
- NEPSTAD, Daniel *et al.* Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains. **Science**, Washington, v. 344, n. 6188, p. 1118-1123, 2014.
- NOOJIPADY, Praveen *et al.* Forest carbon emissions from cropland expansion in the Brazilian Cerrado biome. **Environmental Research Letters**, Bristol, v. 12, n. 2, p. 1-12, 2017.
- NUNES, Ana Paula; CAMPELO FILHO, Eulalio Gomes; BENINI, Elcio Gustavo. A produção da soja e sua influência nas variáveis socioeconômicas da região do Matopiba. **Gestão & Regionalidade**, São Caetano do Sul, v. 39, p. 1-19, 2023.
- OLIVEIRA, Ana Bruna Soares *et al.* Análise da sustentabilidade dos municípios da região MATOPIBA. **Revista de Economia e Agronegócio**, Viçosa, v. 21, n. 2, p. 1-20, 2023.
- OLIVEIRA, Gustavo de L. T. The geopolitics of Brazilian soybeans. **The Journal of Peasant Studies**, London, v. 43, n. 2, p. 348–372, 2016.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA (FAO). **FAOSTAT**: estatísticas. Roma, 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 15 mar. 2022.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA (FAO). “**Climate-smart**” agriculture: policies, practices and financing for food security, adaptation and mitigation. Roma: FAO, 2010.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA (FAO). **Climate smart agriculture sourcebook**. Roma: FAO, 2013.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA (FAO). **FAOSTAT database**. Roma, 2024. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data>. Acesso em: 5 set. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA (FAO). **Global forest resources assessment 2020: key findings**. Roma: FAO, 2020. 16p.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA (FAO). **Land use statistics and indicators 2000–2021: global, regional and country trends**. Roma: FAO, 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA (FAO). **The state of food and agriculture**. Roma: FAO, 2016.

OSBORNE T. B.; MENDEL L. B. The use of soybean as food. **Journal of Biological Chemistry**, v. 32, n. 3, p. 369-387, 1917.

PAGANO, Marcela Claudia; MIRANSARI, Mohammad. The importance of soybean production worldwide. *In*: MIRANSARI, M. (ed.). **Abiotic and biotic stresses in soybean production**. San Diego: Academic Press, 2016. p. 1-26.

PANKRATZ, Alan. **Forecasting with univariate Box-Jenkins models: concepts and cases**. New York: John Wiley & Sons, 1983.

PEREIRA, Caroline Nascimento; PORCIONATO, Gabriela Lanza; CASTRO, César Nunes de. Aspectos socioeconômicos da região do Matopiba. **Boletim Regional, Urbano e Ambiental**, Brasília, n. 18, p. 47-59, 2018.

PEREIRA, Caroline Nascimento; CASTRO, César Nunes de; PORCIONATO, Gabriela Lanza. **Dinâmica econômica, infraestrutura e logística no Matopiba**. Brasília: Ipea, 2018. 77 p. (Texto para discussão, 2382).

PEREIRA, Lorena Izá; PAULI, Lucas. MATOPIBA: controle do território e expansão da fronteira da estrangeirização da terra. **Revista NERA**, Presidente Prudente, v. 22, n. 47, p. 148-172, 2019.

PERI, Massimo. Climate variability and agricultural price volatility: the case of corn and soybeans. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE OF AGRICULTURAL ECONOMISTS, 29., 2015, Milan. **Proceedings...** Milan: International Association of Agricultural Economists, 2015.

PERLOFF, Harvey S. **Regions, resources, and economic growth**. Baltimore: The Johns Hopkins Press for Resources for the Future, 1960. 716p.

PHALAN, Ben *et al.* Crop Expansion and Conservation Priorities in Tropical Countries. **PLoS ONE**, San Francisco, v. 8, n. 1, p. 1-13, 2013.

PHAM, Binh Thai *et al.* Prediction of shear strength of soft soil using machine learning methods. **Catena**, Amsterdam, v. 166, p. 181–191, 2018.

PICOLI, Michelle C. A. *et al.* Impacts of Public and Private Sector Policies on Soybean and Pasture Expansion in Mato Grosso - Brazil from 2001 to 2017. **Land**, Basel, v. 9, n. 1, p. 1-15, 2020.

PIMENTEL, Letícia. Desigualdades no acesso ao saneamento no Brasil: revisão bibliográfica e apontamentos para uma agenda de pesquisa futura. **Revista Em Sociedade**, Juiz de Fora, v. 5, n. 2, p. 137–162, 2024.

PIRES, Mauro Oliveira. ‘Cerrado’, old and new agricultural frontiers. **Brazilian Political Science Review**, São Paulo, v. 14, n. 3, 2020.

PITTA, Fábio Teixeira; VEGA, Gerardo Cerdas. **Impacts of agribusiness expansion in the MATOPIBA region: communities and the environment**. Rio de Janeiro: ActionAid Brasil, 2017. 79 p.

PIVELLO, Vânia R. *et al.* Understanding Brazil’s catastrophic fires: Causes, consequences and policy needed to prevent future tragedies. **Perspectives in Ecology and Conservation**, Rio de Janeiro, v. 19, n. 3, p. 233-255, 2021.

POLIZEL, Silvia Palotti *et al.* Analysing the dynamics of land use in the context of current conservation policies and land tenure in the Cerrado - MATOPIBA region (Brazil). **Land Use Policy**, Amsterdam, v. 109, p. 1-21, 2021.

PORCIONATO, Gabriela Lanza; CASTRO, César Nunes de; PEREIRA, Caroline Nascimento. **Aspectos sociais do Matopiba: análise sobre o desenvolvimento humano e a vulnerabilidade social**. Rio de Janeiro; Brasília, DF: Ipea, 2018. 53 p.

POTAPOV, Peter *et al.* The Global 2000-2020 Land Cover and Land Use Change Dataset Derived From the Landsat Archive: First Results. **Frontiers in Remote Sensing**, Lausanne, v. 3, p. 1-22, 2022.

PROSSER, R. S. *et al.* A review of the effectiveness of vegetated buffers to mitigate pesticide and nutrient transport into surface waters from agricultural áreas. **Journal of Environmental Management**. London, v. 261, p. 1-13, 2020.

QIU, Li-Juan; CHANG, Ru-Zhen. The origin and history of soybean. *In*: SINGH, G. (ed.). **The soybean: botany, production and uses**. Wallingford: CAB International, 2010. p. 1-23.

RAMOS JUNIOR, Edison Ulisses *et al.* Desempenho da soja em sucessão ao consórcio de milho segunda safra com diferentes densidades de *Crotalaria spectabilis*. **Nativa**, Sinop, v. 7, n. 6, p. 649-655, 2019.

RATTER, James A.; RIBEIRO, José F. Biodiversity of the flora of the cerrado. *In*: PEREIRA, Roberto Carvalho; NASSER, Luiz Carlos Bhering. (ed.). **Biodiversidade e produção sustentável de alimentos e fibras nos Cerrados: anais do VIII Simpósio sobre o Cerrado e 1st International Symposium on Tropical Savannas**. Planaltina: Embrapa-CPAC, 1996. p. 3-5.

RATTER, James Alexander; RIBEIRO, José Felipe; BRIDGEWATER, Samuel. The Brazilian Cerrado Vegetation and Threats to its Biodiversity. **Annals of Botany**, Oxford, v. 80, n. 3, p. 223-230, 1997.

- RAUSCH Lisa L. *et al.* Soy expansion in Brazil's Cerrado. **Conservation Letters**, Hoboken, v. 12, n. 6, p. 1-10, 2019.
- REDDINGTON, Carly L. *et al.* Air quality and human health improvements from reductions in deforestation-related fire in Brazil. **Nature Geoscience**, London, v. 8, n. 10, p. 768–771, 2015.
- REIS, Simony Lopes da Silva; PERTILE, Noeli. O MATOPIBA: a modernidade e a colonialidade do desenvolvimento agrícola brasileiro. **Revista Nera**, Presidente Prudente, v. 47, n. 22, p. 64-86, 2019.
- RESENDE, Fernando M. *et al.* Consequences of delaying actions for safeguarding ecosystem services in the Brazilian Cerrado. **Biological Conservation**, Amsterdam, v. 234, 2019.
- RIBEIRO, Jose Felipe; WALTER, Bruno Machado Teles. As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. *In*: SANO, Sueli Matiko; ALMEIDA, Semíramis Pedrosa de; RIBEIRO, Jose Felipe (Ed.). **Cerrado: ambiente e flora**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, v. 1, cap. 6, p. 151-199.
- RICHARDS, Peter D. *et al.* Exchange Rates, Soybean Supply Response, and Deforestation in South America, **Global Environmental Change**, Amsterdam, v. 22, n. 2, p. 454-462, 2012.
- ROCHA, Cassiano Brito; MAJO, Claudio de; SILVA, Sandro Dutra e. A Geo-historical Analysis of Expanding Soybean Frontiers in the Brazilian Cerrado. **HALAC (Historia Ambiental Latinoamericana y Caribeña)**, Guarapuava, v. 12, n. 2, p. 217-252, 2022.
- RODRIGUES Ariane A. *et al.* Cerrado deforestation threatens regional climate and water availability for agriculture and ecosystems. **Global Change Biology**, Oxford, v. 28, n. 22, p.6807-6822, 2022.
- RODRIGUES, Renato de Aragão Ribeiro; PUGAS, José. O Sistema Plantio Direto (SPD) e a conservação do solo. *In*: BARCELOS, Karine. (org.). **Matopiba: perspectivas sobre a sustentabilidade da soja**. Rio de Janeiro: Andrea Jakobsson Estúdio Editorial, 2021. cap. 3, p. 75-77.
- SAIANI, Carlos César Santejo; TONETO JÚNIOR, Rudinei; DOURADO, Juscelino. Desigualdade de acesso a serviços de saneamento ambiental nos municípios brasileiros: evidências de uma Curva de Kuznets e de uma Seletividade Hierárquica das Políticas?. **Nova Economia**, Belo Horizonte, v. 23, n. 3, p. 657–692, 2013.
- SANO, Edson E. *et al.* Cerrado ecoregions: A spatial framework to assess and prioritize Brazilian savanna environmental diversity for conservation. **Journal of Environmental Management**, London, v. 232, p. 818–828, 2019.
- SANO, Edson Eyji. Land Use Expansion in the Brazilian Cerrado. *In*: Hosono, A., Hamaguchi, N., Bojanic, A. (eds). **Innovation with Spatial Impact: Sustainable Development of the Brazilian Cerrado**. Singapore: Springer, 2019. p. 137-162.

SANTOS, Clóvis Caribé Menezes dos. Programa de Cooperação Nipo-Brasileira para o Desenvolvimento dos Cerrados – PRODECER: um espectro ronda os cerrados brasileiros. **Revista Estudos Sociedade e Agricultura**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, p. 385-416, 2016.

SANTOS, Henrique Faria dos. Neoliberalismo e expansão do agronegócio globalizado no Brasil. **Revista Tamoios**, São Gonçalo, v. 18, n. 1, p. 21-46, 2022.

SANTOS, João Francisco Severo dos; NAVAL, Líliana Pena. Soy water footprint and socioeconomic development: An analysis in the new agricultural expansion areas of the Brazilian cerrado (Brazilian savanna). **Environmental Development**, Amsterdam, v. 42, p. 1-14, 2022.

SANTOS, Laís Freitas dos *et al.* Padrões espaciais da produção agropecuária no Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia (MATOPIBA). **COLÓQUIO - Revista do Desenvolvimento Regional**, Taquara, v. 21, n. 3, p. 226-251, 2024.

SANTOS, Laís Freitas dos *et al.* Estrutura fundiária do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia (MATOPIBA): o índice de Gini terras nos anos 2000. **Revista Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 24, n. 92, p. 42-56, 2023.

SANTOS, Rafael Silva *et al.* Simulating soil C dynamics under intensive agricultural systems and climate change scenarios in the MATOPIBA region, Brazil. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 347, p. 1-13, 2023.

SANTOS, Sara Alves dos; CHEREM, Luis Felipe Soares. Estrutura espacial e temporal das Unidades de Conservação no Cerrado: heterogeneidade combinada em prol da conservação. **Sociedade e Natureza**, Uberlândia, v.35, n. 1, p. 1-15, 2023.

SATO, Juliana Hiromi *et al.* Understanding the relations between soil organic matter fractions and N₂O emissions in a long-term integrated crop–livestock system. **European Journal of Soil Science**, Hoboken, v. 70, n. 6, p. 1183-1196, 2019.

SATTOLO, Thales Meinl Schmiedt *et al.* Effects of land use, tillage management, and crop diversification on soil physical quality in Cerrado agricultural systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 85, n. 5, p. 1-29, 2021.

SAUER, Sérgio; LEITE, Sergio Pereira. Agrarian structure, foreign investment in land, and land prices in Brazil. **The Journal of Peasant Studies**, London, v. 39, n. 3–4, p. 873–898, 2012.

SAUER, Sérgio. Soy expansion into the agricultural frontiers of the Brazilian Amazon: The agribusiness economy and its social and environmental conflicts. **Land Use Policy**, Amsterdam, v. 79, p. 326-338, 2018.

SAUER, Sérgio; OLIVEIRA, Karla R. A. Agrarian extractivism in the Brazilian Cerrado. *In*: MCKAY, B.; ALONSO-FRADEJAS, A.; VELTMEYER, H. (org.). **Agrarian extractivism in Latin America**. 1. ed. London: Routledge, 2021. p. 19-40.

SCHNEIDER, Maurício; MARQUES, Ana Alice Biedzicki de; PERES, Carlos A. Brazil's Next Deforestation Frontiers. **Tropical Conservation Science**, Thousand Oaks, v. 14, n. 1, p. 1-12, 2021.

SCHULTZ, Theodore W. Reflections on investment in man. **Journal of Political Economy**, Chicago, v. 70, n. 5, pt. 2, p. 1-8, 1962.

SEEG. **Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa**. [S.l.]: Observatório do Clima, 2021. Disponível em: <http://seeg.eco.br/>. Acesso em: 1 ago. 2021.

SEIXAS, Claudine Dinali Santos *et al.* **Tecnologias de produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2020. 347 p.

SERIGATI, Felipe *et al.* **O mercado de trabalho na fronteira do agronegócio: quanto a dinâmica no Matopiba difere das regiões mais tradicionais?** Rio de Janeiro: Ipea, 2017.

SHARDA, Ramesh; PATIL, Rajendra B. Connectionist approach to time series prediction: An empirical test. **Journal of Intelligent Manufacturing**, London, v. 3, p. 317–323, 1992.

SILVA JÚNIOR, Luiz Honorato da; ARAKAWA, Victor Haselmann. The relationship between agricultural production and municipal tax revenue in Brazil. **Boletim de Conjuntura (BOCA)**, Boa Vista, v. 18, n. 53, p. 666–683, 2024.

SILVA, Osmira Fátima da *et al.* Produção de arroz e feijão em municípios com menores Índices de Desenvolvimento Humano na região do Matopiba, Brasil. **Revista Brasileira de Desenvolvimento Regional**, Blumenau, v. 4, n. 1, p. 181-205, 2016.

SILVA, Patrícia S. *et al.* Putting fire on the map of Brazilian savanna ecoregions. **Journal of Environmental Management**, London, v. 296, p. 1-14, 2021.

SILVA, Ramon Felipe Bicudo da *et al.* Socioeconomic and environmental effects of soybean production in metacoupled systems. **Scientific Reports**, London, v. 11, n. 1, p. 1-12, 2021.

SIMS, Brian; KIENZLE, Josef. Sustainable agricultural mechanization for smallholders: What is it and how can we implement it? **Agriculture**, Basel, v. 7, n. 6, p. 1-21, 2017.

SKORUPA, Ladislau Araujo; MANZATTO, Celso Vainer. **Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil: estratégias regionais de transferência de tecnologia, avaliação da adoção e de impactos**. Brasília: Embrapa, 2019. 471 p.

SONG, Xiao-Peng *et al.* Massive soybean expansion in South America since 2000 and implications for conservation. **Nature sustainability**, London, v. 4, p.784–792, 2021.

SOTERRONI, Aline C. *et al.* Expanding the soy moratorium to Brazil's Cerrado. **Science Advances**, Washington, v. 5, n.7, p. 1-9, 2019.

SOUTHWORTH, Jane *et al.* Latitudes and land use: Global biome shifts in vegetation persistence across three decades. **Frontiers in Remote Sensing**, Lausanne, v. 4, p. 1-17, 2023.

SOUZA JÚNIOR, Carlos M. *et al.* Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, Basel, v. 12, n. 17, p. 1-27, 2020.

SOUZA, Daniela Tatiane de; MAGALHÃES, Luciola Alves; CASTRO, Gustavo Spadotti Amaral. Uma avaliação do impacto do crédito rural e do mercado de trabalho à agropecuária do Matopiba. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ECONOMIA, 50., 2022, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: ANPEC, 2022. p. 1-21.

SOUZA, Geraldo da Silva e *et al.* Technological progress in Brazilian agriculture. **Socio-Economic Planning Sciences**, Amsterdam, v. 72, p. 1-10, 2020.

SOUZA, Glaycon ViníciosAntunes de; PEREIRA, Mirlei Fachini Vicente. MATOPIBA: a Inteligência Territorial Estratégica (ITE) e a regionalização como ferramenta. **Revista NERA**, Presidente Prudente, v. 22, n. 47, p. 22–45, 2019.

SOUZA, Henrique Antunes de; LEITE, Luiz Fernando Carvalho; MEDEIROS, João Carlos. **Solos sustentáveis para a agricultura no Nordeste**. Brasília: Embrapa, 2021. 595 p.

SOUZA, Priscila; ALBUQUERQUE, Amanda de. **Agricultura Familiar Brasileira: Desigualdades no Acesso ao Crédito**. Rio de Janeiro: Climate Policy Initiative, 2023. 20 p.

SPAROVEK, Gerd *et al.* Brazilian Agriculture and Environmental Legislation: Status and Future Challenges. **Environmental Science & Technology**, Washington, v.44, n. 16, p.6046-6053, 2010.

SPERA, Stephanie A. *et al.* Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier. **Global Change Biology**, Oxford, v. 22, n. 10, p. 3405–3413, 2016.

SPERA, Stephanie A. Agricultural Intensification Can Preserve the Brazilian Cerrado: Applying Lessons From Mato Grosso and Goiás to Brazil's Last Agricultural. **Frontier. Tropical Conservation Science**, Thousand Oaks, v. 10, p. 1-7, 2017.

STRAHLER, Alan H. The Use of Prior Probabilities in Maximum Likelihood Classification of Remotely Sensed Data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 10, p.135-163, 1980.

STRASSBURG, Bernardo B. N. *et al.* Moment of truth for the Cerrado hotspot. **Nature Ecology & Evolution**, London, v. 1, n. 4, p. 1-3, 2017.

TATEISHI, Henrique Ryosuke; BRAGAGNOLO, Cassiano; FARIA, Rosane Nunes de. Economic and environmental efficiencies of greenhouse gases' emissions under institutional influence. **Technological Forecasting and Social Change**, New York, v. 161, p. 1-12, 2020.

TRAMONTINA, Lênio; TALAMINI, Edson; FERREIRA, Gabriel Murad Velloso. O impacto da armazenagem da soja na propriedade rural sobre os preços de mercado da commodity e na ampliação da capacidade de armazenamento. *In*: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 46., 2008, Rio Branco. **Anais [...]**. Rio Branco: SOBER, 2008. p. 1-20. Disponível em: <https://ideas.repec.org/p/ags/sbrfsr/112722.html>. Acesso em: 12 set. 2024.

TRIPATHY, Debesh Shankar; PRUSTY, B. Rajanarayan. Forecasting of renewable generation for applications in smart grid power systems. *In: TOMAR, A.; KANDARI, R. (ed.). Advances in smart grid power system*. London: Academic Press, 2021. p. 265-298.

TRUBNIK, T. Ye.; MAZURENKO, O. K. The Shift-Share Method: An Instrument for Analyzing the Dynamics of Industry Structure of the Economy. *Statistics of Ukraine*, Kyiv, v. 87, n. 4, p. 36-47, 2019.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). **Production, Supply and Distribution (PS&D) database**. Washington, 2024. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/home>. Acesso em: 15 jul. 2024.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). **World Agricultural Supply and Demand Estimates**. Washington, 2022. Disponível em: <https://usda.library.cornell.edu/concern/publications/3t945q76s?locale=en>. Acesso em: 18 abr. 2022.

VAN DER WERF, Guido R. *et al.* Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009). *Atmospheric Chemistry and Physics*, Göttingen, v. 10, p. 11707–11735, 2010.

VAN DER WERF, Guido R. *et al.* Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Göttingen, v. 6, p. 3423–3441, 2006.

VERA, Gabriel Ávalos; MERELES, María Victoria Garayo; WESZ JUNIOR, Valdemar João. La expansión de la soja en San Pedro (Paraguay): productores rurales, empresas y relaciones comerciales. *Revista Novapolis*, Asunción, n. 12, p. 105-124, 2017.

VERA-DIAZ, Maria del Carmen; KAUFMANN, Robert K.; NEPSTAD, Daniel C. **The environmental impacts of soybean expansion and infrastructure development in Brazil's Amazon Basin**. Medford: Tufts University, Global Development and Environment Institute, 2009. 20 p.

VIEIRA, Caio Canella; CHEN, Pengyin. The numbers game of soybean breeding in the United States. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, Viçosa, v. 21, p. 1-10, 2021.

VIEIRA, Raísa Romênia S. *et al.* Compliance to Brazil's Forest Code will not protect biodiversity and ecosystem services. *Diversity and Distributions*, Oxford, v. 24, n. 4, p. 434-438, 2017.

VIEIRA, Rita Marcia da Silva Pinto *et al.* Land degradation mapping in the MATOPIBA region (Brazil) using remote sensing data and decision-tree analysis. *Science of The Total Environment*, Amsterdam, v. 782, p. 1-12, 2021.

VILELA, Lourival *et al.* **Consórcio de soja com gramíneas forrageiras tropicais no Cerrado**: produção de grãos e de carne. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2021. 30 p.

VILELA, Lourival *et al.* Sistemas de integração lavoura-pecuária na região do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.46, n.10, p.1127-1138, 2011.

VOLF, Marcelo R. *et al.* Interseeding of ruzigrass into soybean: Strategies to improve forage cultivation in no-till systems. **Annals of Agricultural Sciences**, Cairo, v. 66, n. 1, p. 16–24, 2021.

WAGNER, Elmar. **O programa de desenvolvimento dos Cerrados e sua contribuição à produção de grãos e proteína animal**. Planaltina: Embrapa-CPAC, 1982. 25 p. (Circular técnica, 14).

WANG, Caijie *et al.* Seventy-five years of improvement of yield and agronomic traits of soybean cultivars released in the yellow-huai-hai river valley. **Crop Science**, Madison, v. 56, n. 5, p. 2354–2364, 2016.

WESZ JUNIOR, Valdemar João. Soybean production in Paraguay: Agribusiness, economic change and agrarian transformations. **Journal of Agrarian Change**, Oxford, v. 22, n. 2, p. 317–340, 2022.

WESZ JUNIOR, Valdemar João; BUENO, Viviane do Nascimento. A produção de soja em pequenas propriedades familiares na região das Missões/RS. *In*: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 46., 2008, Rio Branco. **Anais [...]**. Rio Branco: SOBER, 2008. p. 1-18. Disponível em: <http://purl.umn.edu/117267>. Acesso em: 12 set. 2024.

WOOLDRIDGE, Jeffrey M. **Introductory econometrics: a modern approach**. Toronto: Nelson Education, 2015.

WU, Fei. *et al.* Assessing sustainability of soybean supply in China: Evidence from provincial production and trade data. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 244, p. 1-14, 2020.

WULDER, Michael A. *et al.* Fifty years of Landsat science and impacts. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 280, p. 1-21, 2022.

XU, Cailong *et al.* Analysis of soybean yield formation differences across different production regions in China. **Agronomy Journal**, Madison, v. 112, n. 5, p. 4195–4206, 2020.

ZALLES, Viviana *et al.* Near doubling of Brazil's intensive row crop area since 2000. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, v. 116, n. 2, p. 428-435, 2019.

ZHANG, Guoqiang; PATUWO, B. Eddy; HU, Michael Y. Forecasting with artificial neural networks: The state of the art. **International Journal of Forecasting**, Amsterdam, v. 14, p. 35–62, 1998.

ZHANG, Zemin; LU, Changhe. Clustering analysis of soybean production to understand its spatiotemporal dynamics in the North China plain. **Sustainability**, Basel, v. 12, n. 15, p. 1-15, 2020.

ZHUANG, Jiayu *et al.* Current situation and outlook of China's main grain imports. **Agricultural Outlook**, Beijing, v. 18, n. 12, p. 108-113, 2022. (Em chinês).

**APÊNDICE A - RANKING DECRESCENTE DOS 337 MUNICÍPIOS DA REGIÃO DO
MATOPIBA EM IVI**

Tabela A1 – *Ranking* decrescente dos 337 municípios da região do MATOPIBA em IVI.

Continua

Município	Estado	vulrend	vuleduc	vullixo	vulsane	vulagua	IVI
Milagres do Maranhão	MA	78,19	70,05	89,74	99,37	65,26	76,9
Matões do Norte	MA	100,14	63,93	54,96	82,81	51,14	73,89
Morro Cabeça no Tempo	PI	63,80	68,75	76,95	99,78	87,85	73,21
Primeira Cruz	MA	87,19	60,05	75,55	92,29	54,69	72,38
Jenipapo dos Vieiras	MA	77,49	64,73	85,29	79,37	55,69	71,37
Araioses	MA	78,80	66,39	67,44	92,61	57,17	71,35
Humberto de Campos	MA	79,47	65,75	65,78	77,28	65,23	70,86
Santo Amaro do Maranhão	MA	82,96	58,02	67,86	47,39	95,75	70,79
São Francisco do Maranhão	MA	69,54	68,43	76,97	98,31	45,35	69,45
Buriti	MA	60,94	63,51	75,81	99,30	80,55	69,36
Paulino Neves	MA	82,24	55,45	56,99	92,42	74,85	69,36
Santana do Maranhão	MA	81,37	66,77	76,19	82,92	19,88	67,96
Belágua	MA	79,49	54,93	77,49	98,16	44,30	67,62
Presidente Vargas	MA	79,01	51,69	59,34	90,74	74,03	67,08
São Benedito do Rio Preto	MA	73,04	55,19	64,97	89,72	71,55	66,82
Cantanhede	MA	90,39	54,19	50,20	76,50	45,55	65,58
Timbiras	MA	76,96	65,65	51,83	68,13	47,88	65,35
Nina Rodrigues	MA	91,37	42,41	54,45	97,22	55,45	65,16
Duque Bacelar	MA	67,11	57,16	60,26	98,32	61,24	64,52
Pirapemas	MA	77,28	56,30	52,98	88,68	50,48	64,27
Urbano Santos	MA	75,64	54,66	54,02	90,06	55,94	64,11
Cristalândia do Piauí	PI	55,92	63,79	53,32	81,10	83,75	63,94
Brejo	MA	59,24	58,29	79,11	74,19	69,02	63,9
Fernando Falcão	MA	61,78	69,93	67,65	87,00	27,89	63,3
Paratinga	BA	64,06	60,71	65,33	80,21	53,30	63,01
Joselândia	MA	73,06	63,16	39,57	77,29	52,17	62,98
Mansidão	BA	84,78	46,26	56,94	99,66	38,21	62,88
Jatobá	MA	56,32	63,50	78,77	93,33	37,98	62,52
Matões	MA	71,61	67,32	58,33	75,22	18,87	62,1
Gonçalves Dias	MA	65,42	64,85	60,46	89,15	29,76	62,09
Arame	MA	50,15	65,09	64,47	98,69	43,71	60,51
Água Doce do Maranhão	MA	68,15	64,99	67,23	55,09	23,57	60,27

Tabela A1 – *Ranking* decrescente dos 337 municípios da região do MATOPIBA em IVI.*Continuação*

Município	Estado	 vulrend	 vuleduc	 vullixo	 vulsane	 vulagua	 IVI
Mata Roma	MA	54,41	56,49	70,19	86,16	57,96	60,23
Formosa da Serra Negra	MA	50,01	58,21	65,97	99,02	55,66	59,72
Itaipava do Grajaú	MA	73,54	64,65	51,56	56,62	20,86	59,59
São João do Soter	MA	61,62	68,38	69,76	50,47	24,50	59,53
Barreirinhas	MA	58,87	53,99	59,64	62,29	73,85	59,37
Lago Verde	MA	62,08	62,00	63,10	56,61	42,94	59,35
Lago do Junco	MA	62,60	56,01	79,44	45,45	48,69	59,26
Vargem Grande	MA	56,94	57,80	52,67	85,29	58,69	59,25
São Félix de Balsas	MA	29,15	67,44	80,99	96,04	62,05	59,07
Canápolis	BA	68,68	59,21	49,89	61,21	41,06	58,83
São Raimundo do Doca Bezerra	MA	73,33	64,79	31,69	86,17	15,67	58,81
Sebastião Barros	PI	39,12	67,35	60,29	96,85	56,21	58,79
Lagoa do Mato	MA	62,18	65,05	56,17	70,39	27,38	58,77
Senador Alexandre Costa	MA	57,19	62,10	54,05	99,54	29,53	58,58
Santa Quitéria do Maranhão	MA	62,57	59,07	66,97	51,70	41,41	58,35
Brejolândia	BA	41,17	63,74	64,45	99,50	51,50	58,3
Pio XII	MA	65,27	60,47	54,56	50,92	41,48	58,04
Governador Eugênio Barros	MA	67,11	58,65	52,86	99,38	10,95	57,92
São Bernardo	MA	54,67	57,92	59,67	67,76	57,36	57,88
São José dos Basílios	MA	64,08	64,83	44,92	98,91	8,35	57,81
Avelino Lopes	PI	63,53	61,25	37,46	86,18	35,46	57,74
Riacho Frio	PI	51,36	64,44	48,99	97,91	36,53	57,71
Bom Lugar	MA	59,07	65,53	63,37	21,60	49,24	57,62
Lago dos Rodrigues	MA	59,50	55,11	34,93	92,86	57,68	57,3
Graça Aranha	MA	63,46	61,98	54,25	98,43	4,15	57,23
Fortuna	MA	67,59	60,54	45,66	90,64	11,84	57,21
São Luís Gonzaga do Maranhão	MA	59,78	63,35	69,41	30,72	37,63	57,14
Feira Nova do Maranhão	MA	38,92	64,16	54,19	97,91	58,01	57,12
Santa Filomena do Maranhão	MA	63,47	62,13	58,77	87,91	5,10	57,12
Tutóia	MA	55,74	58,11	49,98	90,51	41,84	56,98
Aldeias Altas	MA	53,27	64,56	46,76	48,35	59,68	56,86
Sítio Novo	MA	43,98	58,13	69,48	86,76	50,53	56,64
Amarante do Maranhão	MA	54,45	61,96	50,71	90,20	29,15	56,44
Anapurus	MA	52,78	54,18	63,41	88,38	41,32	56,15
Satubinha	MA	53,84	63,69	61,84	79,71	18,08	56,05
Poção de Pedras	MA	60,04	60,29	43,61	36,60	56,30	55,63

Tabela A1 – *Ranking* decrescente dos 337 municípios da região do MATOPIBA em IVI.*Continuação*

Município	Estado	vulrend	vuleduc	vullixo	vulsane	vulagua	IVI
Parnarama	MA	55,21	64,81	60,45	54,50	25,18	55,51
Peritoró	MA	50,71	59,48	49,89	83,29	42,69	55,42
Mirador	MA	43,19	60,63	54,77	94,29	45,66	55,41
Serra Dourada	BA	48,68	58,37	51,73	93,80	41,20	55,31
Parnaguá	PI	48,36	59,07	64,63	69,61	42,52	55,29
Tuntum	MA	56,64	62,30	42,81	84,51	21,00	54,74
Buritirana	MA	60,18	61,89	29,08	97,91	18,54	54,72
Sucupira do Riachão	MA	59,25	66,75	54,21	35,32	22,29	54,71
Recursolândia	TO	21,34	77,80	47,46	99,42	45,06	54,23
Paraibano	MA	56,87	61,41	22,95	95,41	30,00	53,96
Cotegipe	BA	43,51	61,64	48,15	99,43	33,12	53,88
Cristópolis	BA	50,59	57,13	52,64	99,21	23,74	53,84
Sítio do Mato	BA	63,77	57,55	54,77	60,58	12,88	53,79
Governador Luiz Rocha	MA	56,69	62,11	40,46	99,59	5,81	53,73
Coroatá	MA	63,70	59,21	41,78	50,38	26,85	53,6
Buriti Bravo	MA	53,68	61,81	39,20	88,81	21,05	53,55
Barra do Corda	MA	54,24	55,24	37,45	84,50	42,36	53,45
Afonso Cunha	MA	41,22	63,32	58,74	68,28	38,85	53,29
Santa Rita de Cássia	BA	54,64	55,58	37,39	87,08	37,49	53,29
Magalhães de Almeida	MA	55,89	55,71	50,26	96,78	12,74	53,09
Passagem Franca	MA	49,11	65,57	37,95	92,95	16,09	53,04
Sucupira do Norte	MA	46,28	60,15	47,87	86,86	31,92	52,99
Coribe	BA	47,21	61,84	44,73	99,06	18,29	52,78
São Domingos do Maranhão	MA	54,56	57,91	46,77	84,33	18,15	52,67
São Roberto	MA	56,64	64,43	31,79	65,12	22,12	52,63
Angical	BA	41,15	56,93	54,80	98,69	34,56	52,44
Feira da Mata	BA	50,94	55,83	38,51	99,40	29,55	52,41
Chapadinha	MA	51,92	50,71	37,58	80,69	54,06	52,28
Júlio Borges	PI	38,06	54,44	57,07	100,00	43,93	52,17
Governador Archer	MA	63,51	56,27	27,57	96,56	8,22	52,15
São Pedro dos Crentes	MA	39,50	59,05	52,78	85,90	39,73	52,03
Nova Iorque	MA	48,36	60,32	37,03	57,65	48,88	52
Manoel Emídio	PI	54,24	55,71	31,52	98,79	25,74	51,96
São João do Paraíso	MA	37,31	59,24	49,61	98,63	34,86	51,46
Esperantinópolis	MA	65,72	60,02	48,51	13,06	17,26	51,11
Olho d'Água das Cunhãs	MA	54,28	60,74	30,91	49,21	37,51	51,08
São Mateus do Maranhão	MA	51,62	53,91	34,78	66,80	47,77	51,05
Wanderley	BA	44,11	58,60	44,46	78,05	35,29	51,02

Tabela A1 – *Ranking* decrescente dos 337 municípios da região do MATOPIBA em IVI.*Continuação*

Município	Estado	vulrend	vuleduc	vullixo	vulsane	vulagua	IVI
São Pedro da Água Branca	MA	64,11	53,35	17,68	94,18	17,35	50,96
Tabocas do Brejo Velho	BA	25,48	61,84	61,85	98,50	37,56	50,64
Carinhanha	BA	57,09	57,26	35,57	56,08	27,32	50,6
Nova Colinas	MA	33,15	57,05	47,86	98,64	42,36	50,1
Santa Luz	PI	48,74	57,93	26,72	97,60	22,75	49,98
Baianópolis	BA	29,45	60,55	65,87	99,41	21,20	49,95
Serra do Ramalho	BA	47,46	52,95	66,50	80,24	10,52	49,95
Santana	BA	41,06	58,36	48,72	85,51	25,25	49,91
Palmeira do Piauí	PI	19,98	66,97	62,47	99,13	26,12	49,48
Alvorada do Gurguéia	PI	36,98	56,60	60,12	68,80	36,17	49,47
Curimatá	PI	45,49	54,91	38,36	85,49	31,26	49,45
Praia Norte	TO	55,41	51,54	49,88	68,09	15,44	49,38
Cristino Castro	PI	49,31	55,33	29,56	91,23	24,20	49,25
Colinas	MA	41,59	58,01	39,88	88,04	25,83	49,09
São Gonçalo do Gurguéia	PI	30,80	64,51	52,74	97,64	13,56	49
Redenção do Gurguéia	PI	48,91	56,16	45,47	86,97	7,15	48,99
Igarapé Grande	MA	49,58	54,84	28,68	65,61	40,22	48,93
Vila Nova dos Martírios	MA	37,68	61,74	33,70	95,47	24,79	48,91
Sambaíba	MA	6,69	66,24	67,24	81,35	62,72	48,84
Montes Altos	MA	60,08	53,01	43,52	21,22	31,37	48,66
Juarina	TO	28,83	53,56	46,40	100,00	51,29	48,57
Ponte Alta do Bom Jesus	TO	36,40	65,46	46,27	33,92	41,65	48,49
Esperantina	TO	36,19	59,98	51,83	54,12	37,51	48,33
Colônia do Gurguéia	PI	49,74	52,25	41,83	82,89	17,45	48,32
Ribamar Fiquene	MA	34,09	59,83	49,61	74,04	31,44	48,22
Riachinho	TO	32,97	57,51	86,26	23,11	36,54	48,2
Bernardo do Mearim	MA	31,70	58,16	66,89	34,72	46,15	47,71
Pequizeiro	TO	26,10	54,26	46,78	99,24	48,59	47,63
Benedito Leite	MA	42,66	59,18	27,33	94,42	15,72	47,49
Carrasco Bonito	TO	37,45	58,57	44,37	85,97	17,89	47,43
Aragominas	TO	30,67	56,01	58,94	55,45	45,15	47,18
São Francisco do Brejão	MA	42,59	55,55	26,51	87,41	29,15	47,17
Alto Alegre do Maranhão	MA	45,27	59,60	35,97	56,82	21,03	47,12
Catolândia	BA	24,22	58,20	61,53	80,50	34,73	47,08
Itapecuru Mirim	MA	44,62	47,88	45,99	64,09	40,77	47,08
Sebastião Leal	PI	9,93	65,39	76,72	97,09	22,31	47,01

Tabela A1 – *Ranking* decrescente dos 337 municípios da região do MATOPIBA em IVI.*Continuação*

Município	Estado	vulrend	vuleduc	vullixo	vulsane	vulagua	IVI
Cocos	BA	19,52	63,64	47,70	95,48	34,09	46,95
Ponte Alta do Tocantins	TO	35,73	57,12	35,55	82,07	33,51	46,88
Chapada de Areia	TO	21,51	60,10	44,76	84,72	48,49	46,83
Piraquê	TO	14,48	56,28	55,23	99,49	55,11	46,68
Barão de Grajaú	MA	40,34	53,76	37,04	54,77	46,13	46,61
Maurilândia do Tocantins	TO	31,59	51,11	52,40	95,89	31,66	46,53
Rio Sono	TO	24,79	59,10	50,72	76,93	39,72	46,51
Lajeado Novo	MA	39,68	61,11	42,87	30,53	35,35	46,45
Bertolândia	PI	43,99	55,30	30,01	96,76	10,21	46,37
Babaçulândia	TO	28,33	55,97	44,11	75,57	46,31	46,35
Dom Pedro	MA	50,10	54,10	34,83	51,08	22,25	46,18
Monte Alegre do Piauí	PI	20,41	58,93	60,56	97,53	23,59	46,05
Itapiratins	TO	11,90	60,17	34,14	85,25	75,51	45,95
Pastos Bons	MA	34,66	52,44	39,02	96,23	29,08	45,94
Pindorama do Tocantins	TO	30,06	54,86	34,90	97,85	36,24	45,88
Rio dos Bois	TO	18,18	57,45	48,07	98,86	43,91	45,88
Dois Irmãos do Tocantins	TO	16,70	58,77	50,92	78,43	53,23	45,74
Nazaré	TO	44,38	50,55	31,22	96,93	16,26	45,71
Coelho Neto	MA	51,37	56,05	28,24	54,45	13,76	45,64
São Bento do Tocantins	TO	43,85	50,92	39,65	57,25	31,73	45,42
São João dos Patos	MA	41,87	52,44	23,67	93,44	21,75	45,04
Chapada da Natividade	TO	11,94	60,47	45,43	99,23	46,01	44,99
Itaguatins	TO	35,73	56,28	44,55	35,25	42,25	44,97
São Salvador do Tocantins	TO	27,51	57,83	35,78	78,67	38,23	44,94
Jaú do Tocantins	TO	19,44	53,60	46,16	97,17	47,29	44,93
Palmeirante	TO	14,77	53,13	53,16	98,38	51,89	44,9
Grajaú	MA	36,66	52,80	32,04	87,51	27,01	44,81
Conceição do Tocantins	TO	32,70	55,67	32,28	83,32	29,34	44,59
Barra do Ouro	TO	22,55	52,64	55,10	96,33	30,59	44,54
Marcos Parente	PI	49,12	59,13	16,38	64,52	6,21	44,41
Taipas do Tocantins	TO	32,72	58,94	23,53	95,00	19,26	44,35
Monte Santo do Tocantins	TO	18,23	54,05	56,46	72,33	49,32	44,25
Monte do Carmo	TO	10,97	56,23	52,83	93,25	49,77	44,1
Porto Alegre do Tocantins	TO	34,77	51,48	26,79	98,70	26,03	43,88

Tabela A1 – *Ranking* decrescente dos 337 municípios da região do MATOPIBA em IVI.*Continuação*

Município	Estado	vulrend	vuleduc	vullixo	vulsane	vulagua	IVI
Riachão	MA	18,77	59,30	40,10	79,79	41,88	43,87
Aurora do Tocantins	TO	32,43	48,75	36,45	97,01	30,09	43,79
João Lisboa	MA	52,10	48,33	29,11	56,42	17,09	43,79
Muricilândia	TO	27,66	47,15	38,37	98,39	42,44	43,65
Porto Alegre do Piauí	PI	34,40	57,10	30,21	61,98	29,17	43,58
Filadélfia	TO	34,03	52,08	38,62	58,25	36,35	43,34
Santa Terezinha do Tocantins	TO	32,75	50,31	35,90	97,60	20,86	43,27
Senador La Rocque	MA	44,82	54,43	23,06	62,85	15,22	43,26
Lavandeira	TO	24,50	52,22	35,32	98,47	35,32	43,22
Arraias	TO	26,29	52,45	35,98	90,93	34,00	43,15
Palmeiras do Tocantins	TO	29,16	51,24	35,09	98,78	26,01	43,14
Capinzal do Norte	MA	22,85	60,38	33,05	97,49	17,16	42,99
Fortaleza dos Nogueiras	MA	20,80	53,30	37,39	87,09	44,13	42,89
São Valério	TO	16,10	55,41	34,75	99,47	43,89	42,85
Codó	MA	39,55	55,98	34,90	43,18	20,88	42,79
Tupiratins	TO	27,69	54,21	40,71	54,57	41,74	42,79
Sítio Novo do Tocantins	TO	46,52	46,06	42,91	46,38	21,66	42,78
Currais	PI	6,77	63,78	62,21	97,79	15,17	42,77
Paraná	TO	19,07	58,14	45,15	58,26	44,60	42,77
Barreiras do Piauí	PI	11,42	60,24	43,13	97,33	31,85	42,53
Goiatins	TO	30,73	50,51	48,08	66,05	26,68	42,41
Gilbués	PI	14,91	58,62	35,13	98,55	33,50	42,31
Riachão das Neves	BA	8,02	58,86	52,08	98,83	31,56	42,22
Santa Maria da Vitória	BA	36,68	53,50	34,42	64,24	16,31	42,13
São Félix do Coribe	BA	36,37	50,21	26,18	86,59	19,41	42,02
Goianorte	TO	13,97	49,75	33,23	94,98	61,68	41,83
Wanderlândia	TO	32,74	49,34	26,92	95,76	19,23	41,42
Santa Filomena	PI	5,64	55,19	46,97	83,12	55,05	41,16
Santa Tereza do Tocantins	TO	33,00	45,95	25,67	97,06	26,14	41,1
São Miguel do Tocantins	TO	29,54	47,58	26,71	93,74	30,26	40,99
Abreulândia	TO	13,11	44,89	63,68	90,70	41,19	40,82
Santa Rita do Tocantins	TO	7,02	44,25	53,59	96,02	64,87	40,82
Bernardo Sayão	TO	23,50	49,23	32,76	89,86	34,61	40,72
Itaporã do Tocantins	TO	19,60	49,41	32,36	99,03	37,71	40,67
Landri Sales	PI	27,09	62,73	18,06	69,73	15,11	40,67
Novo Jardim	TO	29,82	52,71	17,90	97,87	18,61	40,66

Tabela A1 – *Ranking* decrescente dos 337 municípios da região do MATOPIBA em IVI.*Continuação*

Município	Estado	vulrend	vuleduc	vullixo	vulsane	vulagua	IVI
Cidelândia	MA	40,03	54,41	32,26	26,83	20,49	40,65
Couto Magalhães	TO	14,95	53,53	38,37	79,62	43,31	40,58
Caxias	MA	42,40	47,72	30,68	45,38	22,16	40,52
Colméia	TO	27,91	48,02	23,40	95,23	30,94	40,43
Lizarda	TO	25,80	58,28	44,88	28,47	28,77	40,43
Marianópolis do Tocantins	TO	10,44	55,98	37,52	97,62	35,01	40,4
Lagoa do Tocantins	TO	22,44	53,28	29,31	85,02	29,40	40,34
São Sebastião do Tocantins	TO	37,86	46,24	23,08	99,27	8,18	40,31
Araguatins	TO	34,41	45,29	28,69	82,48	24,56	40,29
Palmeirópolis	TO	23,40	55,15	18,12	97,82	18,91	39,62
Sandolândia	TO	18,20	50,90	32,57	60,34	53,78	39,62
São Félix do Tocantins	TO	27,85	44,19	23,77	98,73	32,12	39,52
Combinado	TO	35,47	45,91	21,94	99,48	9,53	39,49
Novo Acordo	TO	26,73	49,83	22,48	97,74	17,67	39,14
Dueré	TO	11,84	52,21	36,16	92,38	36,96	39,13
Centenário	TO	18,84	53,09	33,94	68,78	34,07	39,01
Luzinópolis	TO	21,78	44,62	41,26	98,85	23,45	38,98
Presidente Dutra	MA	34,10	46,89	25,44	70,51	20,86	38,9
Taguatinga	TO	25,12	53,71	27,90	61,84	26,64	38,89
Carolina	MA	26,11	50,86	27,12	70,21	27,49	38,87
Eliseu Martins	PI	44,93	57,20	23,21	5,02	7,37	38,56
Lima Campos	MA	23,48	58,52	33,21	38,83	23,83	38,54
Ananás	TO	36,88	51,34	26,93	35,13	19,17	38,41
Pau D'Arco	TO	25,31	51,24	29,52	63,12	26,46	38,36
Tocantínia	TO	22,24	42,22	51,45	65,65	33,35	38,08
Santa Fé do Araguaia	TO	23,41	48,07	20,19	98,73	23,88	38,06
Presidente Kennedy	TO	26,68	44,46	16,42	98,97	29,83	38,05
Axixá do Tocantins	TO	41,51	52,88	24,12	29,53	6,31	37,97
Barrolândia	TO	22,66	46,25	32,80	95,38	19,40	37,96
Davinópolis	MA	43,21	46,19	20,42	57,10	6,33	37,9
Nova Olinda	TO	18,47	48,15	27,38	98,61	25,79	37,71
São Domingos do Azeitão	MA	14,23	57,86	16,54	79,76	32,01	37,71
Itinga do Maranhão	MA	26,26	50,36	20,46	85,36	14,35	37,5
Divinópolis do Tocantins	TO	16,08	49,46	27,40	75,21	40,07	37,3
Bacabal	MA	39,07	43,64	24,80	49,68	18,59	37,19
Buriti do Tocantins	TO	36,39	50,49	9,37	73,97	5,33	37,18
Crixás do Tocantins	TO	10,67	43,40	31,69	96,06	51,18	37,12
Pium	TO	11,24	47,17	37,57	85,38	39,34	37,05

Tabela A1 – *Ranking* decrescente dos 337 municípios da região do MATOPIBA em IVI.*Continuação*

Município	Estado	vlrend	vuleduc	vullixo	vulsane	vulagua	IVI
Rio da Conceição	TO	34,62	41,43	9,33	97,53	18,31	36,95
Araguaçu	TO	13,30	48,71	26,83	87,72	36,96	36,75
Jaborandi	BA	3,94	59,36	51,77	58,52	22,66	36,68
Santa Maria do Tocantins	TO	10,95	48,36	31,89	92,30	33,95	36,55
Corrente	PI	22,87	45,58	36,58	66,38	24,43	36,51
Mateiros	TO	6,21	46,54	35,76	97,29	42,79	36,45
São Raimundo das Mangabeiras	MA	14,41	51,98	23,40	80,13	30,96	36,45
Natividade	TO	20,20	44,14	30,51	98,69	18,69	36,34
Oliveira de Fátima	TO	22,54	48,27	15,33	97,99	17,09	36,33
Cachoeirinha	TO	19,11	52,30	23,20	86,67	13,32	36,32
Silvanópolis	TO	12,13	49,90	17,13	86,39	43,81	36,31
Correntina	BA	5,65	56,61	45,42	53,32	32,58	36,22
Pugmil	TO	15,14	47,77	19,87	98,09	30,96	36,19
Governador Edison Lobão	MA	28,02	54,21	26,10	35,55	15,45	36,18
Bandeirantes do Tocantins	TO	10,88	47,84	33,07	91,64	31,70	36,16
Itacajá	TO	20,89	48,98	29,75	61,17	24,85	35,86
São Desidério	BA	3,20	55,42	40,28	79,94	26,11	35,77
Bom Jesus do Tocantins	TO	16,53	47,21	23,04	97,91	22,29	35,73
Alto Parnaíba	MA	10,95	54,97	35,24	59,08	26,87	35,72
Novo Alegre	TO	29,66	46,35	24,23	47,35	23,54	35,62
Angico	TO	34,00	49,18	29,42	12,19	20,13	35,31
Carmolândia	TO	18,15	52,11	14,19	56,35	37,35	35,3
Almas	TO	13,55	51,82	23,91	81,00	22,99	35,27
Cariri do Tocantins	TO	4,42	50,06	29,06	89,13	39,84	35,26
Araguanã	TO	24,15	60,37	14,71	7,29	29,77	35,18
Cristalândia	TO	20,51	46,08	22,42	79,03	23,96	35,12
Brasilândia do Tocantins	TO	14,89	50,29	19,88	83,01	25,11	35,05
Santa Rosa do Tocantins	TO	8,63	50,59	34,10	39,71	53,64	35,04
Peixe	TO	7,24	53,10	38,56	44,03	41,46	34,92
Aparecida do Rio Negro	TO	10,83	48,79	26,34	89,33	27,55	34,91
Augustinópolis	TO	32,70	46,68	19,92	53,37	9,23	34,83
Sucupira	TO	1,69	48,48	29,44	98,98	40,27	34,77
Timon	MA	42,90	40,39	18,09	44,13	8,04	34,58
Tupirama	TO	9,17	43,45	33,43	92,56	34,50	34,53
Figueirópolis	TO	11,58	47,40	21,15	82,04	36,55	34,5
Estreito	MA	16,68	44,44	26,49	83,55	25,57	34,46

Tabela A1 – *Ranking* decrescente dos 337 municípios da região do MATOPIBA em IVI.*Continuação*

Município	Estado	vulrend	vuleduc	vullixo	vulsane	vulagua	IVI
Baixa Grande do Ribeiro	PI	4,28	57,76	48,08	49,58	16,51	34,24
Caseara	TO	7,10	41,07	34,44	96,93	39,35	34,14
Ipueiras	TO	18,99	48,76	35,88	10,83	42,98	34,1
Santo Antônio dos Lopes	MA	2,67	56,73	35,71	68,76	22,20	34,08
Brejinho de Nazaré	TO	9,88	50,30	20,36	68,46	38,15	33,99
Darcinópolis	TO	13,74	47,75	31,16	66,48	24,02	33,74
Bom Jesus da Lapa	BA	27,55	44,27	28,06	36,07	21,41	33,52
Talismã	TO	9,55	50,37	35,48	39,20	37,88	33,42
Miranorte	TO	18,57	47,74	11,23	94,09	10,69	33,27
Arapoema	TO	9,76	50,71	18,25	88,59	19,78	33,2
Loreto	MA	16,01	51,11	23,73	19,38	39,43	32,73
Campestre do Maranhão	MA	32,80	49,99	10,16	23,39	9,12	32,31
Ribeiro Gonçalves	PI	5,06	55,16	49,89	17,64	24,97	32,21
Miranda do Norte	MA	17,27	40,55	15,77	69,70	36,12	32,05
Araguacema	TO	14,08	44,99	31,49	31,88	38,43	31,84
Pedreiras	MA	26,84	43,67	18,35	43,32	15,49	31,7
Trizidela do Vale	MA	24,41	49,79	12,14	31,47	16,57	31,5
Xambioá	TO	12,74	45,87	21,31	70,14	18,77	31,14
Taboão	TO	8,47	43,05	17,99	99,04	20,87	31,03
Antônio Almeida	PI	12,51	51,38	21,06	63,07	5,96	30,83
Porto Franco	MA	13,29	45,20	18,85	76,65	14,65	30,78
Tasso Fragoso	MA	2,15	52,21	27,67	61,78	21,53	30,62
Dianópolis	TO	15,70	42,06	15,08	84,98	14,15	30,54
Formoso do Araguaia	TO	7,62	44,24	31,33	46,37	35,79	30,43
Aliança do Tocantins	TO	4,76	44,56	17,01	80,73	32,61	30,26
Tocantinópolis	TO	34,63	38,38	16,62	24,78	12,77	30,12
Lagoa da Confusão	TO	8,74	41,00	16,56	78,43	32,67	29,98
Nova Rosalândia	TO	19,01	38,30	19,79	35,90	39,33	29,92
Miracema do Tocantins	TO	16,50	40,56	18,62	68,72	18,29	29,88
Sampaio	TO	16,49	47,14	21,21	36,36	17,30	29,77
Campos Lindos	TO	4,91	49,65	32,70	33,74	27,45	29,63
Formosa do Rio Preto	BA	3,21	50,31	30,98	29,62	28,49	28,91
Lajeado	TO	29,75	34,88	10,40	24,74	30,84	28,82
Uruçuí	PI	5,11	50,35	23,35	54,85	12,24	28,58
Açailândia	MA	15,88	43,11	10,56	63,88	8,01	27,89
Aguiarnópolis	TO	15,51	44,85	14,17	40,62	13,75	27,66
Fátima	TO	22,21	39,36	16,50	9,97	29,82	27,54
Bom Jesus	PI	11,65	40,69	21,07	57,58	13,70	27,26

Tabela A1 – *Ranking* decrescente dos 337 municípios da região do MATOPIBA em IVI.*Conclusão*

Município	Estado	vulrend	vuleduc	vullixo	vulsane	vulagua	IVI
Paraíso do Tocantins	TO	19,74	31,29	7,99	58,63	8,57	24,16
Guaraí	TO	16,06	37,44	9,41	38,60	11,73	24,15
Pedro Afonso	TO	9,45	33,59	11,31	78,47	8,53	23,87
Colinas do Tocantins	TO	22,66	37,63	4,43	18,09	8,17	23,48
Balsas	MA	9,21	39,44	13,09	23,69	20,70	23,12
Alvorada	TO	10,59	40,48	6,47	23,09	20,43	22,99
Imperatriz	MA	20,26	31,50	5,20	9,57	14,02	20,68
Araguaína	TO	18,66	30,59	6,37	28,66	5,01	20,46
Barreiras	BA	13,01	32,68	19,48	7,70	6,03	19,55
Porto Nacional	TO	10,07	30,68	12,93	24,19	14,15	19,46
Gurupi	TO	18,34	26,85	2,95	22,72	10,13	18,74
Palmas	TO	16,72	18,03	18,06	7,56	5,68	15,23
Luís Eduardo Magalhães	BA	6,98	29,81	4,36	8,71	7,95	15,06

Fonte: Elaboração feita com base nos resultados da pesquisa.