

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Instituto de Geociências**  
**Programa de Pós-Graduação em Geografia**

Laís Freitas dos Santos

**SUSTENTABILIDADE AGROAMBIENTAL NA  
RECENTE FRONTEIRA AGRÍCOLA BRASILEIRA DO  
MATOPIBA: análise espacial e indicadores**

Belo Horizonte  
2025

Laís Freitas dos Santos

**SUSTENTABILIDADE AGROAMBIENTAL NA  
RECENTE FRONTEIRA AGRÍCOLA BRASILEIRA DO  
MATOPIBA: análise espacial e indicadores**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Doutora em Geografia.

Orientadora: Profa. Dra. Úrsula Ruchkys de Azevedo

Belo Horizonte  
2025

S237s  
2025

Santos, Laís Freitas dos.

Sustentabilidade agroambiental na recente fronteira agrícola brasileira do Matopiba [manuscrito] : análise espacial e indicadores / Laís Freitas dos Santos. – 2025.

171 f., enc. il. (principalmente color.)

Orientadora: Úrsula Ruchkys de Azevedo.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2025.

Bibliografia: f. 150-171.

1. Sustentabilidade – Teses. 2. Agroindústria – Teses. 3. Indicadores ambientais – Teses. 4. Análise multivariada – Teses. 5. Análise espacial (Estatística) – Teses I. Ruchkys, Úrsula de Azevedo. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 631.6:577.4



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
COLEGIADO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

### **FOLHA DE APROVAÇÃO**

SUSTENTABILIDADE AGROAMBIENTAL NA RECENTE FRONTEIRA AGRÍCOLA BRASILEIRA DO MATOPIBA:  
Análise Espacial e Indicadores

**LAÍS FREITAS DOS SANTOS**

Tese de Doutorado defendida e aprovada, no dia **30 de setembro de 2025**, pela Banca Examinadora designada pelo [Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais constituída pelos seguintes professores:

**Marcos Flávio Silveira Vasconcelos D'Ângelo**

UNIMONTES

**Clésio Marcelino de Jesus**

UFU

**Luís Felipe Soares Cherem**

IGC/UFMG

**Lussandra Martins Gianasi**

IGC/UFMG

Úrsula Ruchkys de Azevedo - Orientadora

IGC/UFMG

Belo Horizonte, 30 de setembro de 2025.



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Flávio Silveira Vasconcelos DAngelo, Usuário Externo**, em 01/10/2025, às 10:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Clesio Marcelino de Jesus, Usuário Externo**, em 03/10/2025, às 15:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lussandra Martins Gianasi, Professora do Magistério Superior**, em 06/10/2025, às 10:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luis Felipe Soares Cherem, Professor do Magistério Superior**, em 06/10/2025, às 12:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ursula Ruchkys de Azevedo, Professor(a)**, em 07/10/2025, às 08:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4585162** e o código CRC **7CDBF7E8**.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Solange e Roberto, que, com muito esforço e dedicação, nunca deixaram de faltar e sempre acreditaram no poder da educação.

Ao meu irmão, pela escuta e pelo ombro-amigo de sempre.

À minha vózinha, Jacira, que sempre acompanhou minhas conquistas, como se fosse dela. À minha Tia Nete que também esteve nesta torcida.

Ao meu companheiro de vida, Pedro, que tem imensa importância na minha vida, por me amparar e apoiar em absolutamente tudo. Por trazer alegria aos dias, amo você.

Ao meu filho, por ter me feito renascer com mais força e coragem para a vida, e por me acompanhar nessa trajetória acadêmica desde a graduação.

A Deus e a todas as forças divinas que colocaram tanta gente boa no meu caminho e me fortaleceram de alguma forma.

À minha orientadora, Professora Úrsula, pelas contribuições, direcionamentos e orientações durante o doutoramento.

Aos professores da banca que apontaram reflexões e direcionamentos importantíssimos para a construção desse trabalho, ao Professor Clésio, que sempre tem contribuições sobre o rural numa perspectiva interdisciplinar. Ao Professor Marcos, com direcionamentos importantes para a construção de indicadores. Ao Professor Luís Cherem, que, desde a qualificação, me trouxe a uma reflexão analítica na geografia sobre meu objeto de estudo, assim como à Professora Lussandra.

Aos professores do IGC que, durante as disciplinas, me levaram à reflexão sobre a leitura geográfica deste trabalho, em especial, a Professora Valéria. Agradeço também ao pessoal da Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Geografia, em especial à Márcia, por toda a ajuda na resolução dos problemas burocráticos.

O doutorado é um título muito importante, mas também um processo solitário, ainda mais para quem migra para outro estado. Agradeço a quem esteve junto e deixou esse processo o menos solitário possível, às amigas e aos amigos que o IGC, a UFMG e Belo Horizonte me proporcionaram: Érica, Lucas, Thiago, Sarah, Alice, Giliellen, Sensei Marcelo e o pessoal da Full House, Alessandra, Patrícia, Cris, Manoela, Helena.

Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, pelo financiamento desta pesquisa.

Dedico este trabalho à minha família,  
pelos momentos de ausência.

## RESUMO

O Matopiba, considerado a mais recente fronteira agrícola do Brasil, vem se consolidando como espaço de expansão do agronegócio, mas também como território marcado por intensos processos de transformação socioambiental. Em 2023, o Plano de Desenvolvimento Agropecuário e Agroindustrial do Matopiba (PDA-Matopiba) instituiu como um dos objetivos o desenvolvimento agropecuário com base na sustentabilidade agroambiental e na gestão territorial. Entretanto, uma questão que surge para alcançar este objetivo do PDA-Matopiba é quantificar a sustentabilidade agroambiental dessa região, já que, para avaliar a sustentabilidade agroambiental, é necessário considerar diferentes critérios ambientais, econômicos e sociais. Diante desse contexto, esta tese teve como objetivo principal avaliar a sustentabilidade agroambiental do Matopiba por meio de uma abordagem multicritério espacial baseada em lógica *fuzzy*. Inicialmente, realizou-se uma análise bibliométrica sistemática que revelou uma lacuna de estudos sobre a sustentabilidade agroambiental no Matopiba, ao mesmo tempo em que evidenciou a importância crescente da análise multicritério no campo da sustentabilidade. Em seguida, foram analisados problemas específicos da região, como o abandono de terras agrícolas, que atingiu aproximadamente 4 milhões de hectares entre 2006 e 2021, com destaque para áreas no Tocantins e no Maranhão, e a vulnerabilidade ambiental das áreas protegidas do oeste baiano, avaliada por meio da Análise Hierárquica de Processos (AHP) espacial, que indicou maior fragilidade em zonas próximas a cursos d'água. Com base nessas análises, desenvolveu-se o resultado central da tese, consistente em uma metodologia de avaliação da sustentabilidade agroambiental do Matopiba por meio da análise multicritério espacial *fuzzy*. Com a metodologia proposta, foram avaliados três cenários: máximo otimismo, máximo pessimismo e neutro. Os cenários foram submetidos a uma análise de autocorrelação espacial, que permitiu identificar grupos de microrregiões de baixa e alta sustentabilidade agroambiental. Os resultados evidenciaram que, embora grande parte da região apresente potencial de sustentabilidade, há áreas específicas do Matopiba com baixa sustentabilidade, especialmente no Tocantins, o que pode estar associado à expansão da pecuária, ao desmatamento e à degradação dos solos. A abordagem proposta mostrou-se eficaz para avaliar a sustentabilidade agroambiental no Matopiba, integrando as diferentes dimensões da sustentabilidade e reduzindo incertezas metodológicas comuns na análise multicritério. Os resultados obtidos podem oferecer subsídios para a gestão e o planejamento territorial sustentável das atividades agrícolas e para a formulação de políticas públicas.

**Palavras-chave:** análise multicritério; análise espacial; Matopiba; sustentabilidade agroambiental; indicadores.

## ABSTRACT

Matopiba, considered the newest Brazilian agricultural frontier, has been consolidating as a space for agribusiness expansion, but also as a region marked by intense processes of socio-environmental transformation. In 2023, the Agricultural and Agroindustrial Development Plan of Matopiba (PDA-Matopiba) established agricultural development based on agro-environmental sustainability and territorial management as one of its objectives. However, one question that arises in achieving this PDA-Matopiba: objective is how to quantify the agro-environmental sustainability of this region, since assessing agro-environmental sustainability requires considering different environmental, economic, and social criteria. Given this context, the main objective of this work was to evaluate agro-environmental sustainability in Matopiba using a spatial multi-criteria approach based on fuzzy logic. Initially, a systematic bibliometric analysis was conducted, which revealed a gap in studies on agro-environmental sustainability in Matopiba, while also highlighting the growing importance of multi-criteria analysis in the field of sustainability. Subsequently, specific concerns in the region were analyzed, such as the farmland abandonment, which reached approximately 4 million hectares between 2006 and 2021, particularly in areas in Tocantins and Maranhão, and the environmental vulnerability of protected areas in the western part of Bahia, assessed using the spatial Analytical Hierarchical Process (AHP), which indicated more significant fragility in areas close to watercourses. Based on these analyses, the central result of the thesis was developed: a methodology for assessing agro-environmental sustainability in Matopiba using fuzzy spatial multi-criteria analysis. Using the proposed methodology, three scenarios were evaluated: maximum optimism, maximum pessimism, and a neutral scenario. The scenarios underwent a spatial autocorrelation analysis, which identified groups of microregions with low and high agro-environmental sustainability. The results showed that, although most of the region presented potential for sustainability, specific areas of Matopiba concentrated low-sustainability areas, especially in Tocantins, which might be associated with the expansion of livestock farming, deforestation, and soil degradation. The proposed approach proved effective in assessing agro-environmental sustainability in Matopiba, integrating the different dimensions of sustainability and dealing with methodological uncertainties common in multicriteria analysis. The results obtained can provide support for sustainable territorial management, planning of agricultural activities, and the formulation of public policies.

**Keywords:** multi-criteria analysis; spatial analysis; Matopiba; agri-environmental sustainability; indicators.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Localização geográfica do Matopiba. . . . .	20
Figura 1.2 – Trajetória da construção da tese. . . . .	32
Figura 2.1 – Produção científica anual de publicações indexadas no Scopus que abordam o Matopiba. . . . .	36
Figura 2.2 – Periódicos e número de publicações indexadas no Scopus que abordam o Matopiba. . . . .	37
Figura 2.3 – Número de autores em publicações indexadas no Scopus que abordam o Matopiba. . . . .	37
Figura 2.4 – Autores e número de publicações indexadas no Scopus que abordam o Matopiba. . . . .	38
Figura 2.5 – Rede de co-citação dos autores que citaram o Matopiba em seus estudos. . . . .	39
Figura 2.6 – Principais palavras no conteúdo dos artigos indexados no Scopus que tratam do Matopiba. . . . .	40
Figura 2.7 – Produção científica anual de publicações indexadas no Scopus que abordam estudos de sustentabilidade. . . . .	46
Figura 2.8 – Autores e número de publicações indexadas no Scopus que abordam estudos de sustentabilidade. . . . .	46
Figura 2.9 – Número de autores em publicações indexadas no Scopus que abordam estudos de sustentabilidade. . . . .	47
Figura 2.10–Número de publicações por periódico em publicações indexadas no Scopus que abordam estudos de sustentabilidade. . . . .	48
Figura 2.11–Rede de co-citação dos autores que abordaram técnicas de MCDA para estudos de sustentabilidade . . . . .	49
Figura 2.12–Principais palavras no conteúdo dos artigos . . . . .	50
Figura 2.13–Produção científica anual de publicações indexadas no Scopus que abordam a Sustentabilidade e MCDA <i>fuzzy</i> . . . . .	52
Figura 2.14–Autores e número de publicações indexadas no Scopus que abordam a Sustentabilidade e MCDA <i>fuzzy</i> . . . . .	53
Figura 2.15–Número de autores em publicações indexadas no Scopus que abordam a Sustentabilidade e MCDA <i>fuzzy</i> . . . . .	53
Figura 2.16–Periódicos e número de publicações. . . . .	54
Figura 2.17–Rede de co-citação dos autores que abordaram técnicas de MCDA <i>fuzzy</i> para estudos de sustentabilidade. . . . .	55
Figura 2.18–Principais palavras no conteúdo dos artigos. . . . .	55

Figura 3.1 – A metodologia proposta para identificação espaço-temporal do abandono de terras agrícolas no Matopiba, Brasil. . . . .	68
Figura 3.2 – Elipse de desvio padrão (SDE) de áreas agrícolas abandonadas (AF) no Matopiba, Brasil. . . . .	74
Figura 3.3 – Elipse de desvio padrão (SDE) do estoque de terras agrícolas abandonadas (AFS) no Matopiba, Brasil. . . . .	75
Figura 3.4 – Estimativa da densidade de kernel do abandono de terras agrícolas no Matopiba-Brasil. . . . .	76
Figura 3.5 – Relação entre classes de declividade e áreas de concentração de abandono agrícola no Matopiba, Brasil. . . . .	77
Figura 4.1 – Principais áreas protegidas do Oeste da Bahia. . . . .	84
Figura 4.2 – Metodologia para construção do índice de vulnerabilidade ambiental via Análise Hierárquica de Processos. . . . .	85
Quadro 4.1 – Fontes de coleta dos dados utilizados como critérios para obtenção do índice de vulnerabilidade ambiental no Oeste da Bahia. . . . .	86
Figura 4.3 – Mapa da vulnerabilidade ambiental das áreas protegidas do Oeste da Bahia: I) Área de Proteção Formosa do Rio Preto, II) Área de Proteção Ambiental Bacia do Rio de Janeiro, III) Área de Proteção Ambiental São Desidério, IV) Flona de Cristópolis, V) Revis das Veredas do Oeste Baiano, VI) Parna Grande Sertão Veredas. . . . .	93
Figura 5.1 – Etapas metodológicas da aplicação da MCDA <i>fuzzy</i> com o S-OWA. . .	108
Figura 5.2 – Etapas metodológicas da aplicação da MCDA <i>fuzzy</i> com o S-OWA. . .	114
Quadro 5.1 – Descrição das variáveis selecionadas como critérios para caracterizar a sustentabilidade agroambiental. . . . .	116
Figura 5.3 – Funções de pertinência dos critérios (a) Atividade - Lavoura-Temporária, (b) Atividade - Pecuária, (c) Atividade - Produção Florestal. . . . .	119
Figura 5.4 – Funções de pertinência dos critérios (a) Uso das terras - Lavoura, (b) Uso das terras - Pastagem, (c) Cisternas. . . . .	120
Figura 5.5 – Funções de pertinência dos critérios (a) Utilização de Agrotóxicos, (b) Despesas com Agrotóxicos, (c) Uso de Irrigação. . . . .	121
Figura 5.6 – Funções de pertinência dos critérios (a) Assistência técnica, (b) Agricultura familiar . . . . .	122
Figura 5.7 – Funções de pertinência dos critérios (a) Carbono no solo T/ha, (b) Gini Terras . . . . .	123
Figura 5.8 – Cenário de máximo otimismo. . . . .	126
Figura 5.9 – Análise de autocorrelação espacial do cenário otimista da sustentabilidade agroambiental no Matopiba. . . . .	127

Figura 5.10–Cenário de máximo pessimismo. . . . .	129
Figura 5.11–Análise de autocorrelação espacial do cenário pessimista da sustentabilidade agroambiental no Matopiba. . . . .	130
Figura 5.12–Cenário neutro. . . . .	132
Figura 5.13–Análise de autocorrelação espacial do cenário neutro da sustentabilidade agroambiental no Matopiba. . . . .	133
Figura 6.1 – Mapa de síntese territorial da sustentabilidade agroambiental no Matopiba	141

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Valores das áreas de terras agrícolas Abandonadas (AF) identificadas em hectares do ano de 2006 a 2018 no Matopiba. . . . .	72
Tabela 3.2 – Análise estatística da terras Recultivadas e estoque de abandono no Matopiba. . . . .	73
Tabela 3.3 – Área de cada tipo de solo encontrado nas terras agrícolas abandonadas identificadas de acordo com os dados de $AF_{2018-2021}$ . . . . .	78
Tabela 3.4 – Área de cada grupo de aptidão agrícola de acordo com os dados de terras agrícolas abandonadas de 2018. . . . .	79
Tabela 4.1 – Categorização das classes de declividade de acordo com o nível de vulnerabilidade. O nível 1 indica baixa vulnerabilidade e o nível 6 alta vulnerabilidade. . . . .	87
Tabela 4.2 – Categorização das classes de litologia de acordo com o nível de vulnerabilidade. O nível 1 indica baixa vulnerabilidade e o nível 3 indica alta vulnerabilidade. . . . .	88
Tabela 4.3 – Categorização das classes de pedologia (tipos de solos) de acordo com o nível de vulnerabilidade. O nível 1 indica baixa vulnerabilidade e o nível 3 alta vulnerabilidade. . . . .	88
Tabela 4.4 – Categorização das classes de uso e ocupação do solo de acordo com o nível de vulnerabilidade. O nível 1 indica baixa vulnerabilidade e o nível 3 alta vulnerabilidade. . . . .	89
Tabela 4.5 – Valores de $RI$ propostos por Saaty (1977). . . . .	91
Tabela 4.6 – Classes de vulnerabilidade ambiental. . . . .	92
Tabela 4.7 – Área correspondente a cada uma das classes de vulnerabilidade ambiental. . . . .	94
Tabela 5.1 – Uso e ocupação dos solos nos grupos de dependência espacial “Baixo-Baixo” e Alto-Alto”. . . . .	135
Tabela 5.2 – Síntese dos cenários de sustentabilidade agroambiental. . . . .	136

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1 Descrição da área de estudo	19
1.2 As relações entre a geografia, a expansão agrícola e a sustentabilidade agroambiental na recente fronteira agrícola brasileira do Matopiba	21
1.3 Cronologia de construção da tese	32
1.4 Organização da tese	33
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>34</b>
2.1 Revisão bibliométrica dos estudos realizados no Matopiba	34
2.1.1 Métodos de análise bibliométrica	34
2.1.2 Coleta do conjunto de dados	35
2.1.3 Resultados e discussão	35
2.1.4 Conclusão	42
2.2 Revisão bibliométrica sobre análise multicritério <i>fuzzy</i> aplicada ao estudo da sustentabilidade	43
2.2.1 Coleta dos conjuntos de dados	44
2.2.2 Resultados e discussão	45
2.2.3 Conclusão do capítulo	61
<b>3 DETERMINAÇÃO DE TERRAS AGRÍCOLAS ABANDONADAS NO MATOPIBA</b>	<b>62</b>
3.1 Metodologia para rastrear o abandono de terras agrícolas no Matopiba	66
3.1.1 Coleta de dados de uso e cobertura da terra	66
3.1.2 Indicadores para identificação espaço-temporal do abandono de terras agrícolas	67
3.1.3 Ferramentas para análise espacial de indicadores de abandono de terras agrícolas	70
3.1.4 Estabelecendo a relação entre o indicador de abandono de terras agrícolas com declividade, tipos de solo e aptidão agrícola	70
3.2 Resultados e discussão	72
3.2.1 Avaliação de indicadores de abandono de terras agrícolas no Matopiba	72
3.2.2 Análise espacial dos indicadores de abandono de terras agrícolas	73
3.2.3 Relação entre indicadores de abandono de terras agrícolas com declividade e tipos de solo	76
3.3 Conclusão do capítulo	80
<b>4 ANÁLISE HIERÁRQUICA DE PROCESSOS ESPACIAL PARA ESTUDO DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL DAS ÁREAS PROTEGIDAS DO OESTE DA BAHIA DO MATOPIBA, BRASIL</b>	<b>82</b>
4.1 Descrição da área de estudo	83

4.2 Metodologia para construção do índice de vulnerabilidade ambiental via análise multicritério espacial . . . . .	85
4.2.1 Aquisição dos dados . . . . .	86
4.2.2 Categorização e normalização dos critérios . . . . .	86
4.2.3 Análise Hierárquica de Processos (AHP) . . . . .	89
4.3 Resultados e discussão . . . . .	92
4.3.1 Caracterização da vulnerabilidade ambiental das APAs do Oeste da Bahia . . . . .	92
4.4 Conclusão do capítulo . . . . .	94
<b>5 AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE AGROAMBIENTAL NO MATOPIBA USANDO ANÁLISE MULTICRITÉRIO ESPACIAL BASEADA EM LÓGICA FUZZY . . . . .</b>	<b>96</b>
5.1 Breve discussão sobre sustentabilidade nas atividades agrícolas brasileiras . . . . .	99
5.2 Análise multicritério espacial baseada em lógica <i>fuzzy</i> . . . . .	106
5.2.1 Conceitos preliminares de lógica <i>fuzzy</i> . . . . .	106
5.2.2 Visão geral da AHP espacial <i>fuzzy</i> com S-OWA . . . . .	107
5.2.3 <i>Fuzzificação</i> dos critérios . . . . .	109
5.2.4 Agregação dos critérios <i>fuzzy</i> utilizando S-OWA . . . . .	111
5.3 Padrões espaciais dos cenários da sustentabilidade agroambiental . . . . .	112
5.4 Análise multicritério espacial <i>fuzzy</i> aplicada à sustentabilidade agroambiental no Matopiba . . . . .	114
5.4.1 Seleção e descrição dos critérios adotados . . . . .	114
5.4.2 Construção das funções de pertinência para os critérios adotados . . . . .	117
5.5 Resultados e discussão . . . . .	125
5.5.1 Cenário de máximo otimismo . . . . .	125
5.5.2 Cenário de máximo pessimismo . . . . .	128
5.5.3 Cenário neutro . . . . .	131
5.6 Conclusão do capítulo . . . . .	136
<b>6 SÍNTESE INTEGRADA: TERRAS AGRÍCOLAS ABANDONADAS, VULNERABILIDADE EM ÁREAS DE PROTEÇÃO AMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE AGROAMBIENTAL NO MATOPIBA . . . . .</b>	<b>138</b>
6.1 A construção progressiva do diagnóstico: do problema ao modelo . . . . .	138
6.1.1 A identificação de um sintoma crítico: terras agrícolas abandonadas (Capítulo 3) . . . . .	138
6.1.2 A avaliação da pressão sobre elementos naturais protegidos (Capítulo 4) . . . . .	139
6.1.3 A modelagem integrada da sustentabilidade agroambiental (Capítulo 5) . . . . .	139
6.2 Conexões e articulações entre os resultados . . . . .	140
6.2.1 Convergência metodológica . . . . .	140
6.2.2 A convergência espacial e conceitual . . . . .	140

6.3	Implicações consolidadas para políticas públicas e gestão ambiental . . . . .	142
6.3.1	Direcionamento espacialmente explícito de políticas públicas . . . . .	142
6.3.2	Fortalecimento da governança e do planejamento integrado . . . . .	143
6.4	Reflexões finais sobre a abordagem da pesquisa e perspectivas . . . . .	143
6.4.1	Avaliação da abordagem metodológica integrada . . . . .	143
6.4.2	Limitações da pesquisa . . . . .	144
6.5	Sugestões para pesquisas futuras . . . . .	144
6.6	Conclusão do capítulo . . . . .	144
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>146</b>
7.1	Implicações para políticas públicas e planejamento territorial . . . . .	148
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>150</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Matopiba (acrônimo formado a partir de Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia) é a mais recente fronteira agrícola do Brasil e é constituída por 31 microrregiões de quatro estados brasileiros, sendo 135 municípios no Maranhão, 139 no Tocantins, 33 no Piauí e 30 na Bahia. A sua área total é de 73.173.485 hectares, com uma população de 6.212.600 habitantes, conforme o Censo Demográfico de 2022 (IBGE, 2023).

O Matopiba diferencia-se de outras fronteiras agrícolas brasileiras por ter sido estabelecido numa região demograficamente estruturada, com baixo valor econômico e apto à exploração agropecuária (Pereira e Pauli, 2016; Belchior, Alcantara e Barbosa, 2017). A construção do Matopiba ocorreu com apoio do Estado em três pilares: as inovações tecnológicas, o apoio às pesquisas científicas por meio do auxílio técnico e de extensão rural e no crédito, por meio do Sistema Nacional de Crédito Rural (SNCR) (Favareto *et al.*, 2019). O Plano de Desenvolvimento Agropecuário do Matopiba previa políticas públicas voltadas ao desenvolvimento de uma agricultura e pecuária de menor impacto, visando reduzir impactos ambientais e melhorar a qualidade de vida da população (Belchior, Alcantara e Barbosa, 2017).

Mais recentemente, em 2023, o Governo Federal publicou o decreto nº 11.767, que apresenta o Plano de Desenvolvimento Agropecuário e Agroindustrial do Matopiba, com o objetivo de fomentar e orientar políticas públicas voltadas ao desenvolvimento econômico, ambiental e social de maneira sustentável (Brasil, 2023b). O decreto especifica a promoção de programas e projetos que promovam o desenvolvimento agropecuário baseado na sustentabilidade agroambiental e na gestão territorial.

Apesar do crescimento econômico observado no Matopiba entre 1999 e 2017, nota-se que este se concentrou em poucos municípios, aumentando a desigualdade de renda (Widmarck, 2020). O crescimento de alguns setores agrícolas não resultou em redução das disparidades sociais (Colussi, 2017). Além disso, a intensificação das atividades agrícolas trouxe impactos ambientais significativos (Vieira *et al.*, 2021) e aumentou a concentração fundiária (Santos *et al.*, 2023). Os impactos da expansão das atividades agropecuárias têm sido relacionados à degradação do Cerrado e da Amazônia, tanto na perda de bens e serviços do ecossistema quanto no aumento da desigualdade social causada pela concentração de terras. Por exemplo, a supressão da vegetação nativa do Cerrado em decorrência da expansão da criação de gado e dos cultivos de plantações de soja, cana-de-açúcar e eucalipto (Vieira *et al.*, 2021). Diante do exposto, é necessário um estudo aprofundado da avaliação da sustentabilidade agroambiental do Matopiba, considerando critérios múltiplos (ambientais, sociais e econômicos) no contexto agrário.

A discussão acerca da sustentabilidade surgiu da preocupação com a manutenção de recursos naturais para as gerações futuras e ganhou impulso no Brasil a partir da Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento em 1992, no Rio de Janeiro (Veiga, 2019). A ideia principal da sustentabilidade envolve a equidade dos fatores ambientais, econômicos e sociais (Opon e Henry, 2020). Questões como mudanças climáticas e acesso a recursos naturais reforçam ainda mais a necessidade de avaliar a sustentabilidade agroambiental (Valizadeh e Hayati, 2021).

Neste contexto, o desenvolvimento de indicadores para quantificar a sustentabilidade é essencial para apoiar a tomada de decisões e elaboração de políticas públicas (Opon e Henry, 2020). No entanto, a construção de indicadores de sustentabilidade é um desafio devido às múltiplas dimensões que envolvem a sustentabilidade e ausência de um modelo padrão de avaliação em específico da sustentabilidade nas atividades agrícolas. Abordagens de Análise de Decisão Multicritério (MCDA, do inglês *Multicriteria Decision Analysis*) são apropriadas para gerar indicadores de sustentabilidade, considerando a natureza multidimensional dos sistemas agrícolas (Talukder *et al.*, 2020). A integração entre MCDA e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) tem se mostrado uma estratégia promissora para planejar a sustentabilidade territorial (Massei *et al.*, 2014).

Dados geográficos são comumente utilizados por pesquisadores, elaboradores e tomadores de decisão no âmbito das políticas públicas (Malczewski, 1999). Os dados geográficos podem ser imagens de satélite, dados de censos ou dados estatísticos que contenham informação espacial de localização. Esses dados podem ser organizados na forma tabular, na disposição de matrizes de dados espaciais, onde cada entidade espacial é descrita por uma localização com coordenadas geográficas, que representam um atributo e variam ao longo do espaço (Malczewski, 1999).

Sendo assim, a representação das observações geográficas é usualmente construída na forma de matriz, onde cada célula da matriz geográfica contém uma informação numérica ou alfanumérica, como dados sobre população, setores censitários, número de famílias, dentre outras informações (Malczewski, 1999). Dependendo do conjunto de dados, a análise pode ser de caráter unidimensional, quando se analisa um único padrão de distribuição espacial e considera-se apenas uma coluna da matriz, ou multivariável, quando a matriz é constituída de mais de uma coluna. Neste último caso, torna-se possível analisar relações espaciais entre mais atributos e assim realizar a análise espacial multicritério (Malczewski, 1999).

A análise multicritério espacial envolve associações entre dados geográficos e critérios de um determinado problema. Esses critérios são determinados por tomadores de decisão, que definem os pesos associados a cada um dos critérios conforme suas preferências

para cada critério, para obtenção de informações que ajudem na tomada de decisões (Malczewski, 2006). Este procedimento se caracteriza por mapas de entrada (associação de dados geográficos e preferências dos tomadores de decisão) e mapas de saída, que são o resultado do procedimento (Silva, 2020).

A análise multicritério espacial envolve a construção da estrutura do problema de decisão multicritério, que geralmente é composta por critérios, alternativas, avaliador(es), padronização dos critérios, ponderação dos critérios e estruturação das alternativas (Silva, 2020). Os critérios podem ser entendidos como o conjunto de variáveis que podem ser conflitantes entre si. Os critérios representam fatores que recebem julgamento dos decisores. O conjunto de alternativas viabiliza a solução para o problema de decisão. Os avaliadores ou decisores são responsáveis por avaliar os critérios, que podem ser um grupo de especialistas ou atores sociais (Malczewski, 2006). A padronização é o processo de “normalização” dos dados para que todos tenham a mesma unidade para avaliação, e a ponderação é a etapa em que há a atribuição da importância de cada critério para, por fim, realizar a estruturação das alternativas (Silva, 2020).

De modo geral, métodos de MCDA consistem em cinco etapas: escolha dos critérios, caracterização estatística e tratamento de dados ausentes, normalização dos dados, ponderação dos critérios e, por fim, a agregação dos critérios (Opon e Henry, 2020). Todas essas etapas estão sujeitas a incertezas, pois comumente dependem da subjetividade na escolha dos decisores e dos seus interesses, além de uma série de fontes de incertezas na utilização de dados secundários (Silva, 2020; Opon e Henry, 2020). As incertezas podem ser categorizadas como externas, quando envolvem fatores ambientais que são indômitos, e internas, quando se trata das escolhas dos decisores (Silva, 2020).

No contexto da avaliação da sustentabilidade, as incertezas encontram-se no paradigma quantitativo e na ausência de um modelo padrão para investigação dos problemas associados à sustentabilidade (Opon e Henry, 2020). Por este motivo, evidencia-se a necessidade de avaliar quantitativamente a sustentabilidade considerando aspectos de robustez às incertezas. Há diversos tratamentos no processo de minimização das incertezas na análise multicritério, que podem ser aplicados a cada etapa que apresenta incertezas metodológicas. Em Boggia *et al.* (2018), por exemplo, os autores utilizaram a ferramenta GeoUmbriaSuit, que reduz o viés na etapa da atribuição de pesos. Neste estudo, os autores utilizam o método de análise multicritério TOPSIS. O estudo de Silva (2020) avaliou a determinação de locais mais apropriados para implementação de energia renovável em Minas Gerais aplicando uma metodologia de análise multicritério espacial *fuzzy* para o tratamento de incertezas associadas ao julgamento dos decisores. O método aplicado por Silva (2020) é uma versão *fuzzy* do método clássico Análise Hierárquica de Processos (AHP).

Uma das principais fontes de incertezas da AHP é o procedimento de atribuição de preferências entre pares de critérios. Este problema é ainda mais evidente em problemas de decisão com um número elevado de critérios. Os pesos utilizados para construir uma alternativa de decisão a partir da soma ponderada dos critérios dependem diretamente da escolha das preferências. Assim, as incertezas metodológicas associadas à normalização das variáveis e à atribuição dos pesos de cada critério podem ser tratadas utilizando ferramentas baseadas em lógica *fuzzy* (Silva, 2020).

Diversos estudos já utilizaram MCDA e MCDA espacial no contexto de sustentabilidade agrícola, demonstrando sua aplicabilidade para decisões de uso da terra e planejamento agrícola sustentável. Latinopoulos (2009) empregou MCDA espacial para alocação eficiente de recursos de água e terra em uma área rural da Grécia levando em conta aspectos sociais, econômicos e ambientais. Feizizadeh e Blaschke (2013) investigaram MCDA espacial para avaliar a utilização ótima de recursos da terra para produção agrícola em Tabriz, no Irã. Bausch, Bojórquez-Tapia e Eakin (2014) discute como combinar MCDA com análise de sistemas como uma abordagem para avaliar a sustentabilidade agroambiental da produção comercial de milho irrigado em Sinaloa, México. Vogdrup-Schmidt *et al.* (2017) propuseram uma metodologia de MCDA espacial para avaliar as decisões de mudança de uso da terra e como essas mudanças afetam serviços ecossistêmicos em um município da Dinamarca. Essa abordagem foi estendida por Vogdrup-Schmidt *et al.* (2019) para avaliar toda a área agrícola da Dinamarca. Musakwa (2018) identificou áreas de reforma agrária adequadas à agricultura no sul da África, utilizando a MCDA, demonstrando que é uma ferramenta adequada para tomada de decisões de áreas propícias à reforma agrária e para escolha de solos aptos às práticas da agricultura sustentável. Em Boggia *et al.* (2018), os autores utilizaram MCDA espacial para avaliar a sustentabilidade na cidade de Malta. Mohamadzadeh *et al.* (2020) avaliaram a sustentabilidade na província do Azerbaijão Oriental no Irã utilizando MCDA espacial e Valizadeh e Hayati (2021) desenvolveram um indicador utilizando MCDA para avaliar a sustentabilidade agrícola em propriedades iranianas.

Apesar de ser mencionado em alguns estudos, o conceito de sustentabilidade agroambiental ainda carece de definição precisa. Neste trabalho, considera-se sustentabilidade agroambiental a articulação equilibrada entre fatores ambientais, sociais e econômicos no contexto da atividade agrícola. Embora o tema esteja presente no Plano de Desenvolvimento Agropecuário e Agroindustrial do Matopiba, os estudos específicos sobre a região permanecem incipientes, configurando a principal lacuna a ser preenchida por esta pesquisa.

A motivação para este estudo reside na necessidade de avaliar a sustentabilidade agroambiental no Matopiba de forma espacial. Além disso, o trabalho visa contribuir

metodologicamente para a avaliação sistemática dessa sustentabilidade, fornecendo uma análise quantitativa e qualitativa em uma região de intensa expansão agrícola. Embora muitos estudos tratassem dos impactos ambientais advindos das atividades agropecuárias na região, há uma certa lacuna em relação a estudos que abordassem o termo sustentabilidade agroambiental no Matopiba. O trabalho pretende preencher a lacuna sobre a temática de forma a contribuir e dar suporte a políticas públicas de sustentabilidade nas atividades agrícolas.

O objetivo principal deste estudo é avaliar a sustentabilidade agroambiental no Matopiba utilizando uma abordagem de análise multicritério espacial fuzzy. Em específico, este trabalho pretende:

- a) Mapear a produção científica sobre o Matopiba e sobre análise multicritério *fuzzy* aplicada a sustentabilidade agroambiental;
- b) Propor indicadores para avaliar a sustentabilidade agroambiental no Matopiba;
- c) Realizar análises espaciais para avaliar a sustentabilidade agroambiental no Matopiba e classificar áreas de acordo com níveis de sustentabilidade.

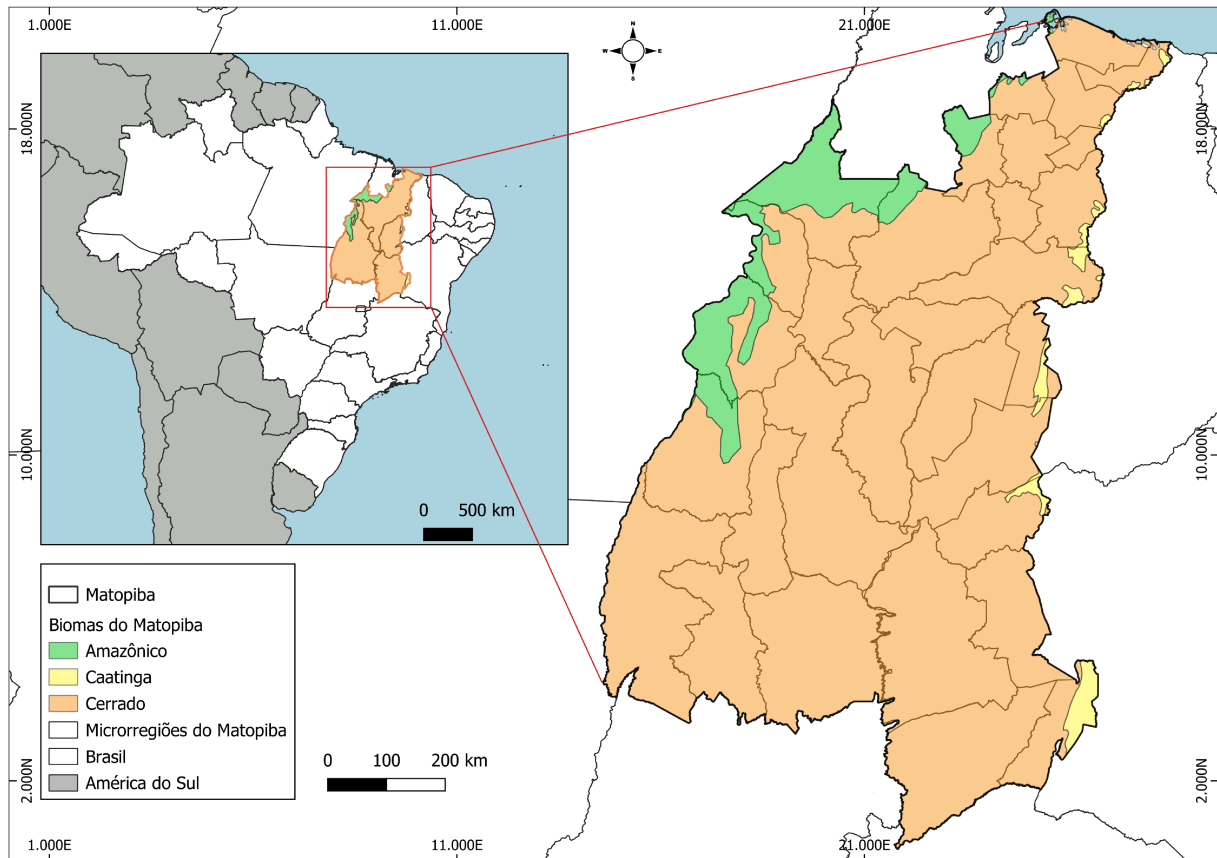
Este trabalho encontra justificativa no suporte à tomada de decisões para processos de gestão e planejamento sustentável das atividades agrícolas do Matopiba, com o intuito de reduzir desigualdades sociais e preservar recursos naturais para futuras gerações, principalmente por meio do suporte a políticas públicas. Para isso, é importante identificar as áreas deprimidas que necessitam de políticas públicas específicas, fornecendo subsídios para minimizar disparidades e promover a sustentabilidade agroambiental.

## 1.1 Descrição da área de estudo

O Matopiba é a fronteira agrícola mais recente do Brasil. A região abrange 31 microrregiões de quatro estados brasileiros: Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. Em 2015, a área total desta região foi medida em aproximadamente 73 milhões de hectares (Magalhães e Miranda, 2014). A área abrange três importantes biomas brasileiros: Cerrado, Amazônia e Caatinga, conforme mostrado no mapa de localização da Fig. 1.1. Em particular, o bioma Cerrado cobre a maior parte da área do Matopiba e é caracterizado principalmente por vegetação arbórea, savana e formações florestais campestres.

A produção agrícola da região é dominada por grandes propriedades que priorizam o agronegócio e refletem a concentração fundiária na institucionalização do Matopiba, apesar do maior número de estabelecimentos de agricultura familiar e da redução observada, entre

**Figura 1.1** – Localização geográfica do Matopiba.



**Fonte:** Elaboração própria a partir dos dados da EMBRAPA (2015).

2006 e 2017, tanto no número total de estabelecimentos agropecuários (de 280.187 para 275.381) quanto em sua área total (de 32.960.092 para 31.577.215 hectares), conforme dados do Censo Agropecuário do IBGE (Santos *et al.*, 2023). Essa redução foi mais pronunciada em pequenas propriedades caracterizadas pela agricultura de subsistência ( $0 \leq \text{área} < 2$  hectares), que perderam aproximadamente 8.000 hectares, e em estabelecimentos médios ( $100 \leq \text{área} < 1.000$  hectares) e grandes ( $\text{área} > 1.000$  hectares), que obtiveram reduções de 716.554 e 957.016 hectares, respectivamente (Santos *et al.*, 2021). Esses dados evidenciaram mudanças na distribuição de terras, sinalizando um declínio na agricultura de subsistência e pressões crescentes das propriedades maiores.

As principais atividades econômicas no Matopiba, de acordo com o Censo Agropecuário de 2017, foram a lavoura temporária e a pecuária; a produção de soja representa 63,68% do valor das culturas temporárias, e a pecuária é uma atividade dominante (IBGE, 2017). Ambos os produtos, amplamente aceitos como commodities no mercado internacional, mantiveram padrões de produção estáveis entre 2006 e 2017, com foco na produção de grãos e na criação de animais de grande porte. No entanto, existem diferenças marcantes entre os tipos de estabelecimento: enquanto as propriedades rurais não familiares dominam a produção em larga escala, as propriedades rurais familiares enfrentam limitações mais

significativas em relação à produtividade (Santos *et al.*, 2024).

O Matopiba também apresenta altos índices de desmatamento e solos com alto potencial erosivo. As práticas agrícolas baseadas na remoção da vegetação natural pode contribuir para aumentar a fragilidade dos solos da região. Por esta razão, é importante adotar práticas de manejo adequadas devido à fragilidade dos solos da região visando reduzir o impacto dos processos de erosão (Gomes *et al.*, 2017). Estima-se que 0,63% dos solos do Matopiba foram considerados deteriorados, dentre os quais 59% das áreas degradadas são arenitos e 25% latossolos. Este último tem a característica de ser solo estável, indicando que outros fatores como eventos climáticos extremos, e manejo inadequado, como o uso do fogo (Vieira *et al.*, 2021). Nesse contexto, a intensificação agrícola pode gerar abandono de terras que se tornam improdutivas em razão da perda de qualidade dos solos.

Diversos tipos de solos são encontrados no Matopiba, como Latossolos Amarelo e Vermelho-Amarelo, Argissolo e Plintossolo Pétrico. Devido às suas características, esses solos podem estar associados a áreas de abandono de terras agrícolas, tema aprofundado no Capítulo 3.

## 1.2 As relações entre a geografia, a expansão agrícola e a sustentabilidade agroambiental na recente fronteira agrícola brasileira do Matopiba

A Geografia Agrária é um campo da ciência geográfica que se dedica ao estudo da atividade agrícola e pecuária em sua dimensão espacial (Ferreira, 2001). Seu foco principal é analisar as características e a organização do espaço rural, abrangendo todos os aspectos que o estruturam. No Brasil a geografia agrária surge como uma ruptura com os estudos agrícolas, que possuíam enfoque em aspectos estritamente naturais da paisagem, passando a analisar as relações de trabalho no campo, a estrutura fundiária e as questões agrárias do Brasil (Ferreira, 2001; Paulino, 2007).

Conforme definem Silva e Stolcke (1981), a questão agrária refere-se aos aspectos de organização de trabalho, produção, renda e emprego no meio rural. O cerne dessa problemática, segundo Kageyama (1993), reside na concentração fundiária, a qual, impulsionada pelo desenvolvimento capitalista, levou à privação do acesso à terra e à consequente precarização da vida dos trabalhadores rurais (trabalho, emprego e renda). Assim, essa privação de acesso aos recursos fundiários constitui a separação dos trabalhadores em relação aos seus meios de produção (Silva e Stolcke, 1981).

No sistema capitalista mundial, o território funciona como mecanismo de poder e estabelece alguns paradoxos de disputa. O conflito essencial na relação Território-

Capital é gerado pela busca incessante da acumulação capitalista, que tem como objetivo remodelar o espaço para a sua própria reprodução. Essa lógica frequentemente exige a apropriação e a incorporação de formas não-capitalistas (caracterizadas pela monopolização do território) e é confrontada por resistências sociais que lutam por maior autonomia e justiça na distribuição e uso do espaço (Paulino, 2007; Oliveira, 2016). Essa disputa pode ser compreendida como uma batalha pela posse e uso da terra: o Capital busca monopolizar e cercar o território para desviar a riqueza e o valor gerados pelo trabalho rural para seus próprios centros de acumulação. Em contrapartida, os camponeses e movimentos sociais lutam para reverter a concentração fundiária e garantir que os recursos e o valor intrínseco do território sirvam à vida comunitária, à autonomia e à justiça social, e não apenas à lógica do lucro (Malagodi, 2017; Paulino, 2007).

A globalização, enquanto fenômeno espacial, permite mensurar a amplitude do poder do Capital. Sua compreensão é facilitada pela análise do desenvolvimento da técnica, da informação e da ciência, que são os vetores dessa expansão (Santos, 2023). O conjunto de técnicas no mundo globalizado é o amontoado de meios instrumentais e sociais com os quais o ser humano realiza a sua vida e a definição dessa técnica evolui em conjunto com o desenvolvimento da humanidade; assim, o espaço geográfico adquire novas formas, definições e características (Santos, 2023). A globalização pressupõe uma nova dinâmica econômica, como mercado unificado, empresas mundializadas, organizações de governança global (Oliveira, 2016).

O mundo globalizado era tido como a possibilidade de ter acesso a técnicas e métodos diferentes em todos os lugares do mundo, tal qual uma aldeia global a partir da diminuição das distâncias (Santos, 2023). No entanto esse fenômeno aprofundou as desigualdades locais, à medida que o capital impunha suas regras sem considerar as diferenciações desses locais, no entender de Santos (2023), a globalização é perversa, pois utiliza a técnica e a ciência para fragmentar o território e promover um território homogeneizado em relação as normas e paisagens (como monoculturas), enquanto exclui e marginaliza as regiões que não são estratégicas para a dinâmica do lucro, resultando em uma exacerbação da pobreza e da desigualdade socioespacial.

Com a predominância dos sistemas técnicos e da informação, a globalização subverte as regras antigas da evolução territorial e impõe novas lógicas de uso e apropriação do espaço Santos (2023). A formação do Meio Técnico-Científico-Informacional provocou transformações radicais tanto na forma de produção quanto nas relações sociais e econômicas no campo; nesse sentido, a agricultura científica globalizada submete o espaço agrário e o trabalho a uma lógica estrita de racionalização e homogeneização (Santos, 2023). Essa agricultura demanda intensamente bens científicos e assistência técnica, forçando os produtores a uma obediência militarizada às regras ditadas pelas atividades hegemônicas,

desde o plantio até a comercialização. Essa submissão aos imperativos técnicos e mercantis, essenciais para permanecer no sistema, acaba por relegar o agricultor moderno à subserviência, onde a única escolha é aceitar as regras do território dominado pelo capital ou ser expulso (Santos, 2023).

As alterações no modo de produção impactaram o território rural, principalmente devido às transformações que se proporcionam com a implantação de infraestrutura voltada para o aumento da produção e a intensificação da circulação de mercadorias (Matos e Pessoa, 2011). O pacote tecnológico da produção agrária pós-revolução Verde propagou-se em dimensões mundiais admitindo uma receita universal que não considerava as diferenciações geográficas presentes no mundo (Silva, 2019; Andrades e Ganimi, 2007). A modernização possibilitou, assim, a complexidade das atividades do campo, principalmente ao modificar o modelo de produção tradicional para uma produção mais acelerada, integrando a agricultura a outros setores da economia.

Esse processo pode ser considerado como um evento de modernização da agricultura através da tecnologia que gerou profundas alterações no espaço rural através de uma uniformização do espaço pela adoção de um pacote tecnológico homogêneo, que acelera a modernização, mas simultaneamente acentua a concentração fundiária e a exclusão social. O espaço rural é, assim, subvertido a mero suporte para a produção em larga escala, ignorando suas multifuncionalidades (Santos, 2023). Além disso, a principal motivação da revolução verde ou revolução tecnológica da agricultura consiste em erradicar a fome; no entanto, esse fenômeno priorizou a produção de *commodities* em detrimento da segurança alimentar para populações tradicionais, enfraquecendo culturalmente essas populações (Porto-Gonçalves, 2004). Os impactos sociais e ambientais da revolução se estendem à construção de um modelo agrícola dependente de insumos, que elevam os custos da produção, contribuem para a deterioração ecológica, resumindo-se a um projeto socialmente injusto e ambientalmente insustentável (Moreira, 2011).

Na nova etapa do capitalismo mundial, houve uma maior integração da burguesia mundial formada a partir da aliança de empresas mundiais com economias nacionais, o que possibilitou maior controle sobre matéria-prima, mercados e mão de obra (Oliveira, 2016). A mundialização da expansão do capital em escala global refere-se ao período histórico movido pelo neoliberalismo com o objetivo de acumulação do capital (Oliveira, 2016). Esse período evidencia a expansão geográfica e o domínio do território por relações colonialistas e imperialistas na solução de problemas internos do capitalismo, problemas estes que não encontram soluções internas e estão relacionados à acumulação do capital que, na busca por solução, se desloca para novos espaços geográficos para gerar ainda mais lucros (Harvey, 2005).

As *commodities* não representam apenas bens primários de produção, mas produtos como soja, milho e outros que foram transformados em ativos de especulação de modo que seus valores são controlados por fundos de investimento que controlam estoques e os preços, criando assim um processo especulativo desses produtos (Oliveira, 2016). Além disso, a produção de *commodities* tende a ser uma produção dependente de insumos agrícolas e tecnologia; essa relação reforça a formação socioeconômica dependente de países como o Brasil, onde forças externas são determinantes em todos os processos, resultando numa organização espacial dependente (Santos, 2023).

O dinamismo territorial revela que o espaço é ativamente produzido e apropriado pelas forças econômicas, manifestando-se nos fluxos e redes que se estabelecem na região. Essas mudanças no espaço, impulsionadas pelas dinâmicas da economia, moldam as características intrínsecas do território. Conforme a perspectiva de Haesbaert (2011), o território pode ser compreendido pela sua materialidade, ou seja, pelo conjunto de condições e recursos concretos que seus habitantes encontram para garantir sua existência e reprodução naquele local. Além disso, o território pode assumir dois aspectos, material na concretização da dominação jurídica e política da terra, que envolve as questões de posse etc e simbólica, na questão cultural e do espaço social, assim o território manifesta múltiplas identidades, podendo ser visto tanto como um recurso ou valor de troca na esfera econômica, quanto como um elemento de valor simbólico (Haesbaert, 2011; Widmarck, 2020).

Sendo assim, a fronteira agrícola é um recorte espacial de escala geográfica capaz de retratar as questões sobre a mobilidade do capital e das relações de produção que também retratam as interações entre a terra, o homem e a natureza e a organização territorial capitalista (Silva, 2006). Em suma, a expansão de fronteiras no Brasil perpassa por questões de mudanças significativas da paisagem natural, a propriedade privada, conflitos territoriais, desigualdades sociais (Silva, 2006). No caso do Matopiba, os conflitos no campo são resultado da expansão da agricultura fomentada pela expansão do capital que gera processos de desterritorialização em decorrência das disputas pelo território, que, segundo Mondardo e Azevedo (2019) as populações tradicionais enfrentam a violência, os assassinatos e a espoliação de seus recursos.

A territorialização do capital demonstra como o neoliberalismo modificou a estrutura de grandes empresas, que passaram a atuar articuladamente em escala mundial, fomentando processos de fusão, aquisição e associação que se caracterizam por dois tipos de processos: a territorialização dos monopólios e a monopolização do território (Oliveira, 2016). Ainda segundo Oliveira (2016), a territorialização dos monopólios na agricultura se dá pelo domínio da propriedade privada (terra), do processo produtivo e do beneficiamento industrial dos produtos agrícolas e a monopolização do território é a prática de controle

dedos mecanismos de subordinação no mercado agrícola executado pelas grandes empresas que regulam a circulação de mercadorias, insumos agrícolas, os preços etc.

Os movimentos de expansão do capital resultaram em processos como a “corrida mundial” em busca de terras nos anos 2000, em que houve um processo de grande aumento nas transações de compras e vendas de terras brasileiras por estrangeiros (Sauer, 2010). A crise mundial da economia em 2008 acentuou a busca de capitais no mercado de terras do Brasil, intensificando, assim, o processo de estrangeirização de terras no país (Bezerra, 2012; Pereira e Pauli, 2016). O termo estrangeirização é uma possível tradução para "*Land grabbing*", que, mesmo apresentando significados distintos, ambos podem ser entendidos como processos complementares (Pereira e Pauli, 2016), uma vez que o capital financeiro promove a obtenção de grandes extensões de terras a empresas e investidores estrangeiros para extração de recursos que geram grandes impactos ambientais e sociais, como a desapropriação de comunidades tradicionais e que de acordo com Pereira e Pauli (2016), é um processo de apropriação do território pelo capital estrangeiro.

O processo de estrangeirização das terras brasileiras se intensificou após a crise de preços de alimentos em 2008, o que fez com que países estrangeiros se interessassem na aquisição de terras para suprir suas necessidades internas. Além disso, o setor financeiro, que anteriormente era avesso ao mercado de terras devido à baixa liquidez (Sauer, 2010), o que aponta a mudança nas relações com a terra, principalmente em regiões de fronteiras agrícolas.

A dinâmica produtiva também se altera nesse contexto de produção de *commodities* que é considerada de capital-intensiva, com maiores investimentos, menor dependência de mão de obra, maximização da produção, alta produtividade (Pereira e Pauli, 2019). Nesse sentido, o modelo de produção agrícola tende a gerar menor distribuição de renda, pois, com a menor dependência da mão de obra, há uma tendência à concentração de renda e riqueza nas mãos dos proprietários do capital e dos fornecedores da tecnologia, e não dos trabalhadores rurais.

Os impactos da estrangeirização são inúmeros e sentidos na escala do território. O território é um espaço produzido cuja dinâmica e características são moldadas ativamente pela economia, especificamente pelos fluxos e redes estabelecidos pelo capital. Essas transformações econômicas são determinantes na materialidade do território, definindo as condições e os meios de existência que seus habitantes encontrarão para sobreviver e se reproduzir naquele lugar, demonstrando o território como um espaço de apropriação (Haesbaert, 2011).

A descontinuação e o enfraquecimento de programas sociais e ambientais no campo, como a extinção do Ministério do Desenvolvimento Agrário (MDA) em 2016, foram impul-

sionados por um projeto político neoliberal alinhado à corrida mundial por terras. Essa mudança resultou na emissão de Medidas Provisórias que, ao enfraquecerem a legislação fundiária e socioambiental, pavimentaram o caminho para a grilagem e a especulação de terras (Sauer e Leite, 2017). Tais medidas favoreceram o produtor empresarial e o agronegócio, ameaçando a sustentabilidade e a permanência da agricultura familiar e dos pequenos agricultores no meio rural, um processo que pode intensificar a concentração de terras e transferir problemas sociais para os centros urbanos (Sauer e Leite, 2017).

Além dos incentivos das políticas públicas por parte do Estado, o fenômeno da estrangeirização do Matopiba contribuiu para a expansão do agronegócio na região. O Estado forneceu o suporte às políticas públicas e, de acordo com Sauer (2010), parte dos investimentos estrangeiros presentes no Matopiba é financiada com recursos públicos. Além disso, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) desempenha papel importante nas pesquisas sobre o desenvolvimento da agropecuária no Cerrado (Pereira e Pauli, 2016). Os investimentos em políticas públicas, o acesso à tecnologia e os financiamentos estrangeiros são responsáveis por todo o desenvolvimento do agronegócio na região. A região do Matopiba, de acordo com Favareto *et al.* (2019), é um território construído mediante apoio estatal baseado nos pilares da inovação tecnológica, no apoio às pesquisas científicas e no crédito rural.

O Matopiba, fronteira agrícola que foi institucionalizada em 2015, possui biodiversidade de vegetação e solos que, em parte, poderiam explicar a concentração da produção agrícola na fronteira. Contudo, esses fatores naturais são insuficientes para justificar a evolução das atividades agropecuárias na região, que se estabeleceram e expandiram graças a políticas de infraestrutura, auxílio tecnológico e ações de ocupação. Sendo assim, o Matopiba e o desenvolvimento do agronegócio são explicados a partir dos incentivos na forma de políticas públicas e das parcerias público-privadas, a exemplo dos programas: o Programa de Assentamento Dirigido do Alto do Parnaíba (PADAP), o Programa de Desenvolvimento Agrícola do Cerrado (POLOCENTRO) e o Programa Nipo-Brasileiro de Desenvolvimento Agrícola da Região dos Cerrados (PRODECER) que foram destaque na década de 1970 e contribuíram para a ocupação agrícola dessa fronteira (Pires, 2000).

Assim, a região se consolidou como uma das mais recentes fronteiras agrícolas do Cerrado brasileiro que se materializa por meio dos investimentos de empresas estrangeiras, com o suporte do Estado (políticas públicas de infraestrutura) para a produção de *commodities* (soja, milho, algodão, criação de animais de grande porte). A expansão do agronegócio no Matopiba apresenta aspectos da territorialização dos monopólios e da monopolização do território, a alta concentração fundiária, a presença de empresas estrangeiras com interesse no mercado de terras, como afirma Pereira e Pauli (2016). Além disso, a região concentra o aumento do desmatamento do Cerrado, conflitos envolvendo

processos de ocupação, retomadas, acampamentos, desterritorialização, trabalho análogo à escravidão e acesso à água (Pereira e Pauli, 2016).

O domínio de um território pode ser entendido a partir da tomada de posse da terra e dos proveitos que delas advêm e para isso há diversas formas de domínio como a compra de propriedades rurais, aluguel, acordos de colaboração ou informais e há as práticas empresarias que são mais complexas, como a sociedade em nome de terceiros, união de empresas etc, mas todas as práticas com objetivo de controle territorial para fins de acumulação de riquezas que resulta na modificação da utilização do solo e nas relações com o espaço (Pereira e Pauli, 2016).

No Matopiba, esse domínio pode ser caracterizado por meio da abrangente expansão do agronegócio na produção de *commodities*, como soja, impulsionada por investimentos estrangeiros e pelo suporte na forma de políticas públicas do Estado. Esse processo se traduz na concentração de terras em grandes latifúndios e na drástica mudança do uso do solo, que, embora gere dinamismo econômico em cidades-polo e aumento do PIB, provoca a desterritorialização de comunidades tradicionais (indígenas, quilombolas) e desencadeia intensos conflitos socioambientais pela posse da terra, pelo acesso à água e pela conservação da biodiversidade.

Nos decretos de institucionalização (2015 e 2023) do Matopiba evidencia-se a preocupação em estabelecer um agronegócio sustentável. Em específico, cabe mencionar que em 2015, o Decreto nº 8.447 estabeleceu o Plano de Desenvolvimento Agropecuário do Matopiba (PDA-Matopiba) e criou seu Comitê Gestor. Em 2020, o decreto nº 8.447 foi revogado pelo decreto nº 10.473, que, embora a fronteira continuasse existindo geograficamente, resultou no desmonte de políticas públicas para o Matopiba. No ano de 2023, um novo decreto nº 11.767 restabelece a região e institui o Comitê Gestor responsável por elaborar o novo Plano de Desenvolvimento Agropecuário e Agroindustrial do Matopiba (PDA-Matopiba) que especifica a necessidade de firmar o compromisso com a sustentabilidade agroambiental e a gestão territorial da região.

As discussões acerca da sustentabilidade na agricultura surgiram a partir da preocupação com os impactos ambientais gerados pelas atividades agrícolas. A discussão sobre sustentabilidade iniciou-se por volta da década de 1980, a partir do Relatório (*Our Common Future*) de 1987, presidido por Brundtland. Nesse momento, o conceito de desenvolvimento sustentável é dado como a necessidade de manutenção de recursos para que próximas gerações também se desenvolvam. Esta definição universalmente aceita estabelece um equilíbrio crucial, pois reconhece que o desenvolvimento deve responder às necessidades humanas essenciais, particularmente as dos mais pobres, ao mesmo tempo em que impõe limites (não absolutos, mas impostos pelo estado da tecnologia e da organização

social sobre os recursos ambientais) para a exploração dos recursos, de modo a garantir a manutenção e a regeneração dos sistemas de suporte à vida do planeta (Brundtland *et al.*, 1991).

A ideia do conceito de sustentabilidade, apesar de estar definida a partir da manutenção de recursos para futuras gerações, não há uma definição padrão para avaliação da sustentabilidade por ser um tema abrangente. A sustentabilidade está relacionada à equidade entre três pilares: ambiental, econômico e social (Opon e Henry, 2020). Mesmo com falta da definição de sustentabilidade, o surgimento das discussões sobre o tema marcou um novo valor ético-social, comparável à "justiça social", e cuja legitimação ocorreu rapidamente em cerca de três décadas (Veiga, 2019).

Em termos econômicos, o desafio da sustentabilidade reside em provar a viabilidade de buscar tanto a expansão da economia quanto a integridade ecológica dos ecossistemas. Há divergências quanto a viabilidade da sustentabilidade que se dividem em vertentes que não encontram consenso entre o pessimismo e o otimismo (Veiga, 2019). O autor ainda afirma, as diferentes correntes de pensamento que por um lado defendem como único caminho possível a sustentabilidade é por meio do crescimento econômico baseada na Curva de *Kuznets* Ambiental que foi refutada anos após o surgimento, por outro lado economistas defenderiam que através de um sistema que as condições de vida de uma sociedade seguissem melhorando sem que houve expansão desse sistema e numa terceira via há os que acreditaram que o processo produtivo se reconfiguraria de modo que ganharia ecoeficiência através da redução da energia exigida, teorias que foram contestadas posteriormente (Veiga, 2019).

Apesar das dificuldades em encontrar uma solução para conseguir conciliar o crescimento econômico e a redução de impactos ambientais, sabe-se que as ações antrópicas das atividades de exploração do meio ambiente vêm ocorrendo de forma insustentável (Veiga, 2019). Os eventos climáticos extremos se tornaram realidade, secas prolongadas, chuvas intensas etc., que, se não forem revertidas, levam a projeções futuras pessimistas, sendo a devastação de ecossistemas naturais, como florestas, e a intensificação do uso de combustíveis fósseis apontados como fatores primários (Gomes e Cardoso, 2021).

No Matopiba os impactos ambientais da expansão do agronegócio já são uma realidade. A intensidade da expansão dessas atividades ocasionou o desmatamento de mais de 50% do bioma do Cerrado devido à substituição da vegetação nativa por plantações de grãos, estima-se que a área substituída pela monocultura de grãos entre 2000 e 2014 foi o dobro da área desmatada na Amazônia no mesmo período (Nepomoceno e Carniatto, 2022). Além disso, a região concentra mais da metade das queimadas do Cerrado (Blanco *et al.*, 2022). O modelo de produção do agronegócio é socialmente e ambientalmente insustentável;

os impactos afetam principalmente pequenos agricultores que estão à margem desse processo produtivo, mas impactam toda a população já que o contexto das ações antrópicas no meio ambiente afeta em escala global, como pode ser observado através da intensidade das alterações climáticas que vêm ocorrendo, que de acordo com Balbino, Cordeiro e Martínez (2011) pode ser evidenciado pelo aumento na frequência e intensidade de secas, inundações, furacões e ciclones, juntamente com o derretimento de geleiras e a elevação do nível do mar.

O Plano de Desenvolvimento Agropecuário do Matopiba (PDA) é historicamente baseado em um modelo de desenvolvimento regional. Diferentemente de um modelo territorial (que costuma focar em identidades sociais e governança local participativa), o PDA foi concebido sob a lógica de Inteligência Territorial Estratégica, tratando a região como uma "ferramenta" para a expansão da agricultura científica e do agronegócio globalizado. Embora o decreto mencione "gestão territorial", o PDA representa um modelo *top-down* de políticas públicas (de cima para baixo).

O Matopiba, apesar de ser considerado uma região, pode ser lido também como um território criado pela lógica de acumulação de capital que fomenta a insustentabilidade, principalmente nos aspectos sociais e ambientais (Nepomoceno e Carniatto, 2022). Território em que coexistem diversos outros territórios visíveis e em disputa, entre o território do agronegócio globalizado e o território vivido das comunidades tradicionais e camponesas, que ocupam o mesmo espaço geográfico sob lógicas e poderes completamente distintos. A dinâmica da produção agrícola do Matopiba é marcada por aspectos como o aumento da concentração fundiária, o aumento dos conflitos por terras, a grilagem de terras, as disparidades sociais e econômicas no campo e diversos impactos ambientais. Apesar das características de uma produção agrícola do Matopiba estarem predominantemente atreladas ao acúmulo de capital, evidencia-se certa preocupação com as questões de conservação e minimização dos impactos ambientais.

O Matopiba, como nova fronteira agrícola no país, se diferencia das demais por apresentar no documento da sua institucionalização certa preocupação em estabelecer atividades agrícolas de maneira mais sustentável. No Decreto 8.447, de 6 de maio de 2015, o documento oficial da criação da fronteira com o nome Matopiba faz menção à sustentabilidade apenas ao estabelecer como meta o desenvolvimento econômico sustentável baseado na agricultura e na pecuária da região. O desenvolvimento econômico sustentável é um conceito que envolve o crescimento econômico de forma a promover a redução de disparidades sociais, a melhoria na qualidade de vida da população e a preservação ambiental (Arraes, Diniz e Diniz, 2006). Além disso, o Plano de Desenvolvimento Agrário do Matopiba é baseado em políticas de incentivo à infraestrutura e, a partir dessas políticas, houve uma ampliação de rodovias, ferrovias, portos, investimentos em tecnologia na recente

fronteira agrícola do Cerrado (AATR, 2021).

No período de 2016 a 2022, o desmonte das políticas ambientais representou o avanço de uma crise ambiental e reforçou a exploração extrativista dos recursos naturais do Brasil. Órgãos públicos foram ameaçados de exercerem suas atividades após os cortes de orçamento rigorosos, como no caso do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA), do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), resultando na flexibilização das políticas de desmatamento Pereira, Origuéla e Coca (2021). A institucionalização do Matopiba e o seu Plano de Desenvolvimento Agropecuário foram revogados no ano de 2020, período marcado por reformas impactantes que alteraram direitos sociais, a agenda da política regional, dispersão de ministérios, superintendências de desenvolvimento e bancos regionais (Monteiro Neto, Colombo e Neto, 2023). Apesar das discussões sobre a revogação, as atividades agropecuárias continuaram a ocorrer; as principais diferenças consistem na execução das políticas públicas AATR (2021). E questões acerca da sustentabilidade nas atividades agropecuárias não foram prioridades nesse período.

No ano de 2023 o decreto 11.767 que trata sobre o Plano de Desenvolvimento Agropecuário e Agroindustrial do Matopiba e cria o seu Comitê Gestor, há a menção do Plano de Desenvolvimento Agropecuário e Agroindustrial do Matopiba de forma a promover políticas públicas para desenvolvimento econômico, ambiental e social sustentável baseados nas atividades agrícolas e em específico da promoção do desenvolvimento agropecuário com base na sustentabilidade agroambiental. Sustentabilidade agroambiental pode ser definida como sustentabilidade nas práticas agrícolas, buscando o equilíbrio entre os pilares econômicos, ambientais e sociais.

As discussões de popularização do termo de sustentabilidade surgiram da preocupação com os impactos ambientais e com a manutenção de recursos naturais. Ainda assim, alguns termos associados à sustentabilidade geram incerteza conceitual; o termo sustentabilidade agroambiental, por exemplo, pode ser um termo caracterizado como a prática de *greenwashing* que é definida a partir do comportamento de empresas que apresentam baixo desempenho ambiental e comunicação positiva sobre o desempenho ambiental (Freitas Netto *et al.*, 2020). A incerteza consiste na efetiva prática de uma sustentabilidade na agricultura e na pecuária, decorrente da falta de uma definição do que seja sustentabilidade agroambiental, e pode representar uma tentativa de conciliar a acumulação capitalista com a preservação mínima, sem alterar a estrutura fundiária e produtiva.

O objetivo da Revolução Verde de erradicar a fome mundial não foi alcançado, pois,

em 2014, ainda havia pessoas passando fome; estima-se que 804 milhões da população estivessem atingidos pela fome (Oliveira, 2016). As políticas de soberania alimentar perderam espaço para as políticas de segurança alimentar, termo anteriormente utilizado pela saúde pública, mas que significou uma redução no suporte à agricultura de base familiar, principalmente em governos neoliberais (Oliveira, 2016). A segurança alimentar definida pela FAO em 1996 afirma que, para existir segurança alimentar, é necessário que todos tenham acesso a alimentos seguros, nutritivos e suficientes, considerando as necessidades dietéticas para uma vida saudável (Mendes e Gonçalves, 2023). No contexto brasileiro, o conceito de segurança alimentar e o de soberania alimentar atendem a demandas diferentes e, ainda assim, são entendidos como conceitos complementares; a soberania alimentar não se limita ao acesso aos alimentos, mas também abrange o local e a forma de produção desses alimentos (Mendes e Gonçalves, 2023).

A expansão agrícola pautada no agronegócio gerou impactos ambientais e sociais no Matopiba, o enfraquecimento das práticas agrícolas tradicionais e o aumento do desmatamento de áreas do Cerrado (Nepomoceno e Carniatto, 2022). O Matopiba é o palco da disputa por posse de terras, fenômeno que é considerado uma ameaça a soberania e à segurança alimentar. A grilagem de terras é a apropriação ilegal de terras públicas (ou de comunidades tradicionais) por particulares, que se concretiza por meio de fraudes documentais, como a falsificação de títulos, a corrupção e transações irregulares, visando à transferência ilícita dessas áreas para o domínio privado (Frederico e Almeida, 2025). No Matopiba, o cenário de apropriação fraudulenta de terras (grilagem) acarreta impactos sociais, ambientais, econômicos e legais profundos na região. Em suma, tal prática perpetua o desmatamento indiscriminado, a espoliação de povos e comunidades tradicionais e configura uma grave usurpação do patrimônio público (Frederico e Almeida, 2025).

O modelo de produção agrícola do Matopiba compromete a Soberania Alimentar, o direito dos povos de definir suas próprias políticas e sistemas de produção local e diversificada, essenciais para a resiliência territorial e o combate à fome. A produção de *commodities* ameaça a soberania alimentar por constituírem modelos produtivos voltados à exportação que subvertem a defesa do acesso a uma alimentação saudável, da produção sustentável, da agroecologia e da agricultura orgânica; a produção sem uso de insumos agrícolas (Mendes e Gonçalves, 2023).

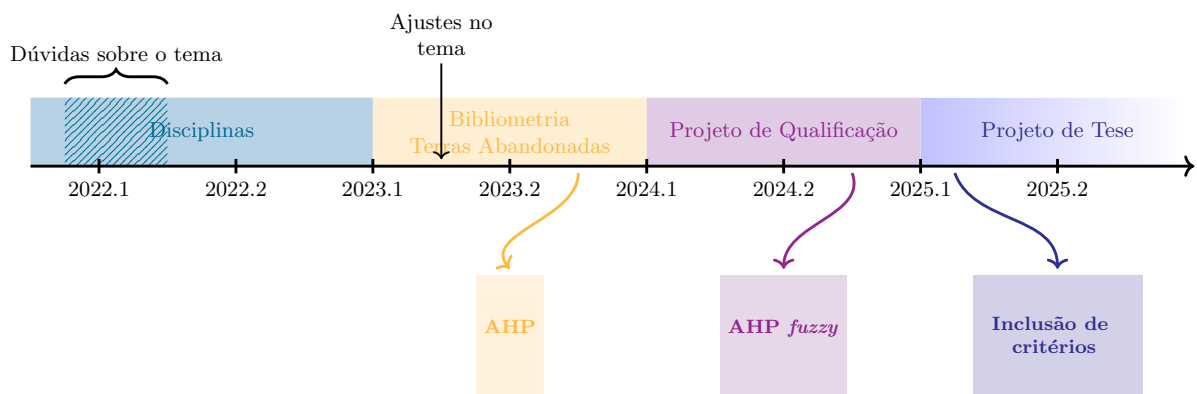
Sustentabilidade e a justiça social no campo dependem da superação da lógica da monocultura e da estrangeirização. Com o suporte na forma de políticas públicas, a pequena agricultura de base familiar é capaz de estimular uma produção mais condizente com a segurança e a soberania alimentar. Ressalta-se ainda que as principais distinções entre o produtor empresarial e o de base familiar consistem no uso da terra, enquanto

o primeiro objetiva a acumulação de capital, a agricultura familiar tem como propósito o uso da própria força de trabalho e dos recursos naturais disponíveis (Malagodi, 2017). Nesse sentido, avaliar a sustentabilidade de sistemas agrícolas pode vir a contribuir para o fomento a políticas públicas voltadas a pequenos produtores, à agricultura familiar, que são grupos que colaboram para a manutenção de recursos naturais, a propagação de práticas ancestrais de agricultura e a existência de grupos minoritários no rural brasileiro.

### 1.3 Cronologia de construção da tese

Esta tese resulta de uma pesquisa de doutorado iniciada em 2022. A trajetória foi marcada por ajustes metodológicos, mas manteve como eixo central a avaliação da sustentabilidade agroambiental no Matopiba (Figura 1.2).

**Figura 1.2** – Trajetória da construção da tese.



**Fonte:** elaboração própria com base nas informações da pesquisa.

No primeiro ano, após a conclusão das disciplinas obrigatórias, surgiram questionamentos acerca do escopo inicial, o que levou à revisão aprofundada da literatura. Em 2023, foi conduzido um estudo preliminar sobre a vulnerabilidade ambiental de áreas protegidas do oeste da Bahia, utilizando o método de Análise Hierárquica de Processos (AHP). Embora amplamente empregada, a AHP foi verificada como apresentando limitações, o que motivou a adoção da análise multicritério espacial fuzzy como estratégia metodológica principal.

Em 2024, a proposta de tese foi aprovada pela banca de qualificação, consolidando o direcionamento da pesquisa. Finalmente, em 2025, o trabalho foi aperfeiçoado para a defesa, culminando na versão final da tese e em publicações científicas associadas ao tema central.

## 1.4 Organização da tese

A tese está organizada em cinco capítulos, além da introdução, que são descritos abaixo.

Capítulo 2 – Revisão de literatura e mapeamento bibliométrico sobre o Matopiba e sobre a análise multicritério *fuzzy* aplicada à sustentabilidade. Este capítulo fornece o referencial conceitual e evidencia as lacunas que justificam a pesquisa.

Capítulo 3 – Estudo sobre a determinação de terras agrícolas abandonadas no Matopiba. Ao identificar áreas degradadas e improdutivas, o capítulo introduz um problema concreto das fronteiras agrícolas e fornece subsídios que serão integrados à avaliação de sustentabilidade.

Capítulo 4 – Avaliação da vulnerabilidade ambiental de áreas protegidas do oeste da Bahia, utilizando o método de AHP espacial. Este capítulo funciona como um ensaio metodológico, testando uma técnica de análise multicritério e apontando suas limitações, o que fundamenta a escolha pela abordagem *fuzzy* no capítulo seguinte.

Capítulo 5 – Núcleo central da tese, dedicado à avaliação da sustentabilidade agroambiental do Matopiba por meio da análise multicritério espacial *fuzzy*. Neste capítulo, os indicadores sociais, econômicos e ambientais são integrados em um modelo que permite classificar a região em diferentes níveis de sustentabilidade.

Capítulo 6 – Sintetiza os principais resultados da tese, articulando de maneira integrativa as inter-relações entre os resultados dos capítulos 3, 4 e 5, destacando as principais contribuições científicas, metodológicas, bem como limitações do estudo e perspectivas para futuras pesquisas.

Esta tese foi estruturada em formato de coletânea de artigos científicos, cada um organizado como capítulo independente (Capítulos 2 a 5). Esse formato justifica a presença de algumas repetições inevitáveis, sobretudo em seções metodológicas e de caracterização da área de estudo. O Capítulo 2 reconhece e sistematiza a lacuna teórica e metodológica sobre o tema; o Capítulo 3 investiga o abandono de terras agrícolas; o Capítulo 4 analisa a vulnerabilidade ambiental de áreas protegidas; o Capítulo 5 sintetiza as abordagens anteriores em uma proposta metodológica integrada, baseada em análise multicritério espacial *fuzzy*, que constitui o núcleo central da pesquisa; e o Capítulo 6 sintetiza de maneira analítica os resultados acerca do abandono de terras agrícolas, da vulnerabilidade ambiental em áreas protegidas e da sustentabilidade agroambiental, apontando as contribuições e limitações do estudo.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura apresentada neste capítulo compreende duas etapas de análise bibliométrica com objetivo mapear e entender sobre quais os assuntos discutidos, a primeira sobre o Matopiba e a segunda sobre métodos de análise multicritério que estavam sendo utilizados para estudar a sustentabilidade agroambiental.

### 2.1 Revisão bibliométrica dos estudos realizados no Matopiba

Este capítulo tem como objetivo apresentar uma revisão bibliométrica dos estudos realizados sobre o Matopiba. A revisão bibliométrica permite analisar quantitativamente a produção científica, identificando padrões, tendências e redes de colaboração entre pesquisadores e instituições. Sua importância no contexto da pesquisa científica reside na capacidade de fornecer uma visão sistemática e abrangente do desenvolvimento de um campo de estudo. Ela ajuda a identificar as principais áreas de pesquisa, os pesquisadores mais influentes, as colaborações internacionais e as lacunas no conhecimento.

No caso do Matopiba, uma região de fronteira agrícola recente, a análise bibliométrica é essencial para entender como a região tem sido abordada na literatura científica, quais são os principais temas investigados e como essas pesquisas podem contribuir para o desenvolvimento sustentável da região. Nesse contexto, utilizou-se uma metodologia de análise bibliométrica aplicada a um conjunto de dados composto por 116 artigos, desde o surgimento da primeira publicação, em 2015, a trabalhos publicados até abril de 2024, disponíveis na base de dados do Scopus.

#### 2.1.1 Métodos de análise bibliométrica

A revisão bibliométrica é utilizada para identificar, avaliar e interpretar temáticas de estudos, responder a uma pergunta de pesquisa, ou área de tópico, ou mesmo avaliar um certo fenômeno de interesse da área científica. A utilização deste tipo de análise se justifica pela possibilidade de realizar uma análise objetiva sobre determinado problema de pesquisa, evidenciando os direcionamentos de um campo de estudo, suas limitações e lacunas de pesquisa (Kitchenham e Charters, 2007).

Para realizar a revisão bibliométrica deste estudo, foi utilizado o pacote *litstudy*, disponível em *Python*, permite extrair metadados de documentos científicos, facilitando a filtragem, seleção e eliminação de duplicatas. Além disso, possibilita a realização de

análises estatísticas de metadados, bem como a visualização de redes bibliográficas na forma de tabelas e gráficos, organizando as informações de cada documento em classes. O *litstudy* também oferece acesso unificado aos metadados, permitindo operações como união, intersecção, diferença e a organização de subconjuntos dos metadados, como a relação entre publicações e seus autores (Heldens *et al.*, 2022).

Uma das ferramentas de análise que o *litstudy* oferece é o agrupamento de tópicos por meio da técnica de aprendizado não supervisionado, que possibilita agrupar os tópicos em conjuntos de palavras de acordo com a similaridade. A obtenção dos tópicos é feita em três etapas: a primeira é o pré-processamento de dados, em que as palavras do título e do resumo do documento de entrada passam por várias etapas de pré-processamento, retornando um objeto denominado *Corpus*, utilizando a função *n-gram detection*. A segunda etapa é a redução de dimensão utilizando a NMF (*Non-negative Matrix Factorization*), que reduz a dimensionalidade dos metadados e tende a agrupá-los conforme os pesos gerados pelo algoritmo. Por último, tem-se a etapa de visualização por nuvens de tópicos (Heldens *et al.*, 2022).

Além da aplicação das técnicas disponíveis no *Litstudy*, também foi utilizado neste trabalho o *VOS Viewer* para visualizar a rede de cocitação. O *VOS Viewer* é um *software* utilizado na construção de grafos para visualização de dados de redes de bibliografia, autores e citações. Na rede gerada, cada cor representa um *cluster*, cada círculo representa um autor, o tamanho do círculo indica o peso dentro de uma rede, e as ligações entre os círculos indicam a colaboração entre os autores (Eck e Waltman, 2023). O número de *clusters* foi ajustado de acordo com o número mínimo de citações de um autor, com o objetivo de obter uma rede de colaboração adequada entre 2 e 5 *clusters* de colaboradores, conforme proposto por Libório *et al.* (2023).

### 2.1.2 Coleta do conjunto de dados

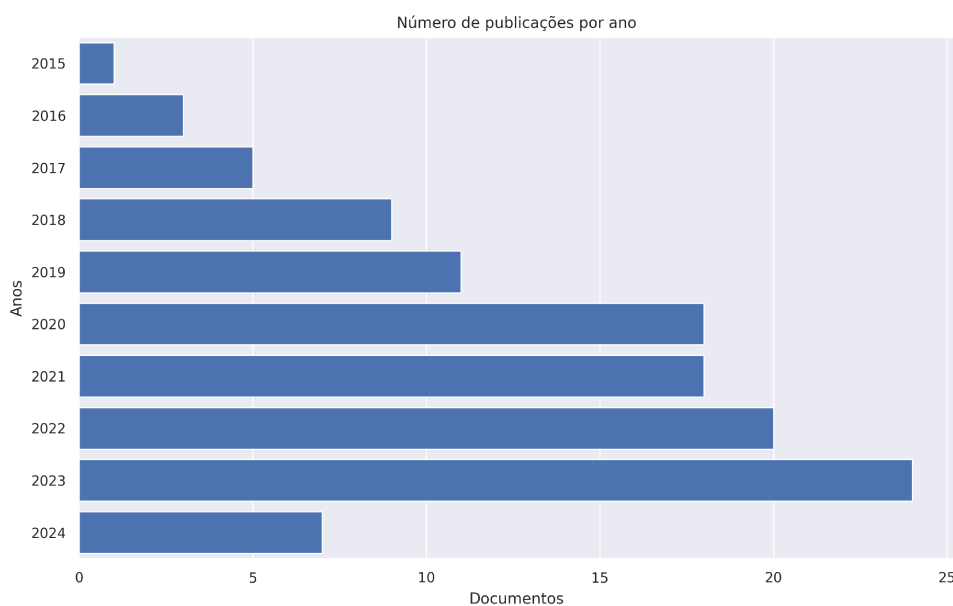
A busca na base de dados Scopus foi realizada com o objetivo de analisar o que tem sido produzido sobre o Matopiba. O termo de busca utilizado, TITLE-ABS-KEY (matopiba), refina a procura apenas por artigos que citam o termo Matopiba no título, no resumo e nas palavras-chave em artigos publicados desde a primeira aparição, em 2015, até abril de 2024. A busca resultou em 116 artigos científicos.

### 2.1.3 Resultados e discussão

A partir da consulta foram obtidos 116 artigos que citavam o Matopiba no título, no resumo e nas palavras-chave entre o período de 2015 e 2024 (Figura 2.1). Nos primeiros cinco anos desde a primeira publicação (período de 2015–2019), foram registradas 29

publicações sobre o Matopiba. O surgimento da primeira publicação coincide com o ano da institucionalização do Matopiba. Entre 2020 e 2024 foram publicados 87 artigos. Observa-se um crescimento no número de publicações ao longo dos anos da análise, sendo que o maior número de publicações sobre o Matopiba foi no ano de 2023, com 23 artigos publicados.

**Figura 2.1** – Produção científica anual de publicações indexadas no Scopus que abordam o Matopiba.



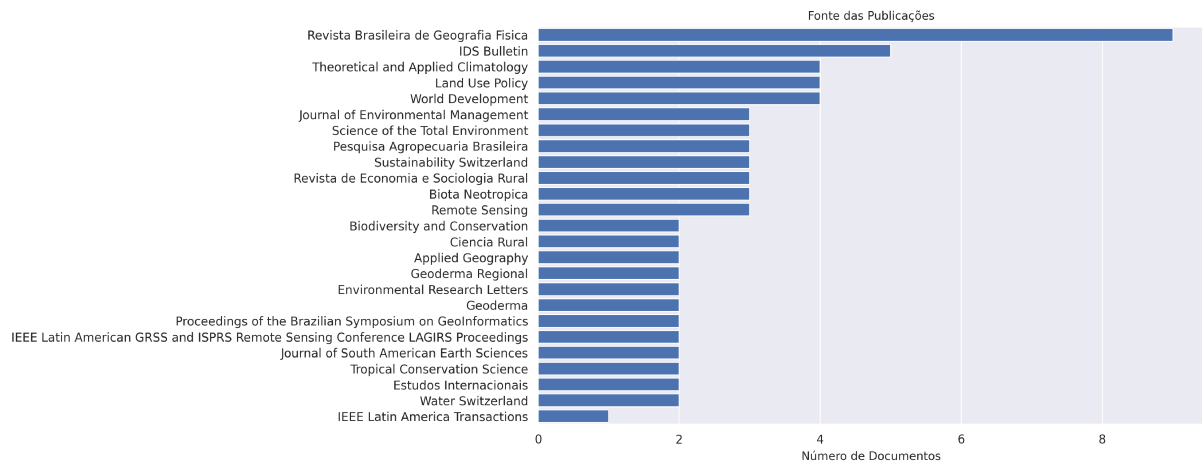
**Fonte:** Dados da pesquisa a partir das informações da plataforma Scopus.

A Figura 2.2 apresenta o número de publicações por periódico. Os periódicos que mais publicaram artigos sobre o Matopiba são a *Revista Brasileira de Geografia Física*, *IDS Bulletin* e *Theoretical and Applied Climatology*. Dos artigos da base de dados, o artigo mais citado, com 265 citações, foi de autoria de Spera *et al.* (2016). Neste artigo, os autores mapearam a região do cerrado para avaliar as mudanças no uso da terra nesse bioma no período de 2003 a 2013, para isso os autores utilizaram técnicas de sensoriamento remoto e concluíram que medidas de mitigação como o cultivo duplo podem reduzir a evapotranspiração dos sistemas de cultivo e impactar menos o ciclo da água no cerrado.

A Figura 2.4 apresenta o número de autores por artigo publicado. Nota-se que a maioria dos artigos publicados possui 4 autores. Embora existam artigos com apenas um autor, também há artigos que contam com até 10 autores.

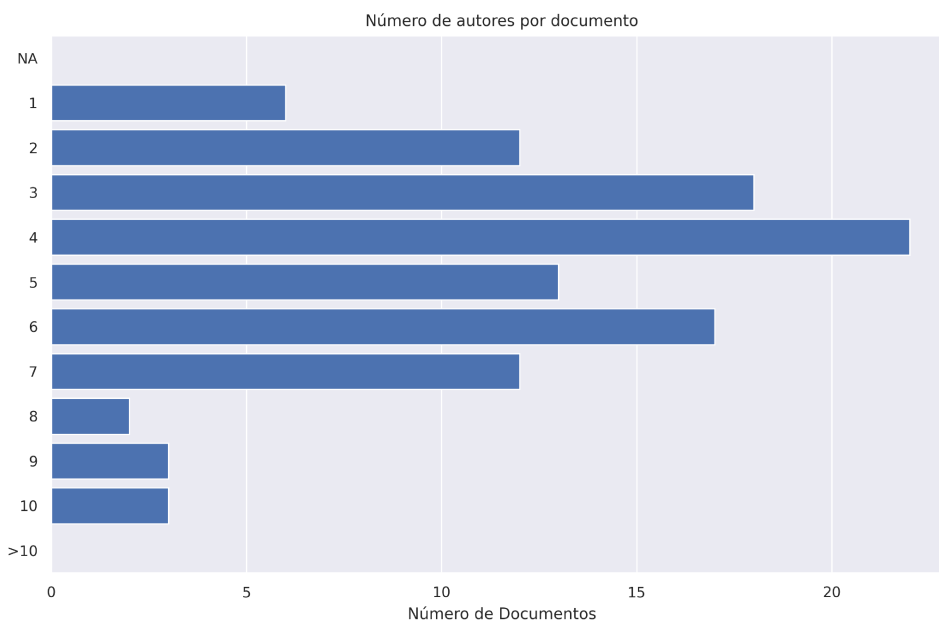
A Figura 2.4 apresenta os autores com maior número de publicações no tema. Os autores mais prolíficos foram Carlos Eduardo Pellegrino Cerri e Rabechy Silva Santos, ambos com 5 publicações indexadas no Scopus. O artigo mais citado, com 12 citações, no qual um dos autores era colaborador, foi o de Locatelli *et al.* (2022). Neste artigo, os

**Figura 2.2** – Periódicos e número de publicações indexadas no Scopus que abordam o Matopiba.



**Fonte:** Dados da pesquisa a partir das informações da plataforma Scopus.

**Figura 2.3** – Número de autores em publicações indexadas no Scopus que abordam o Matopiba.

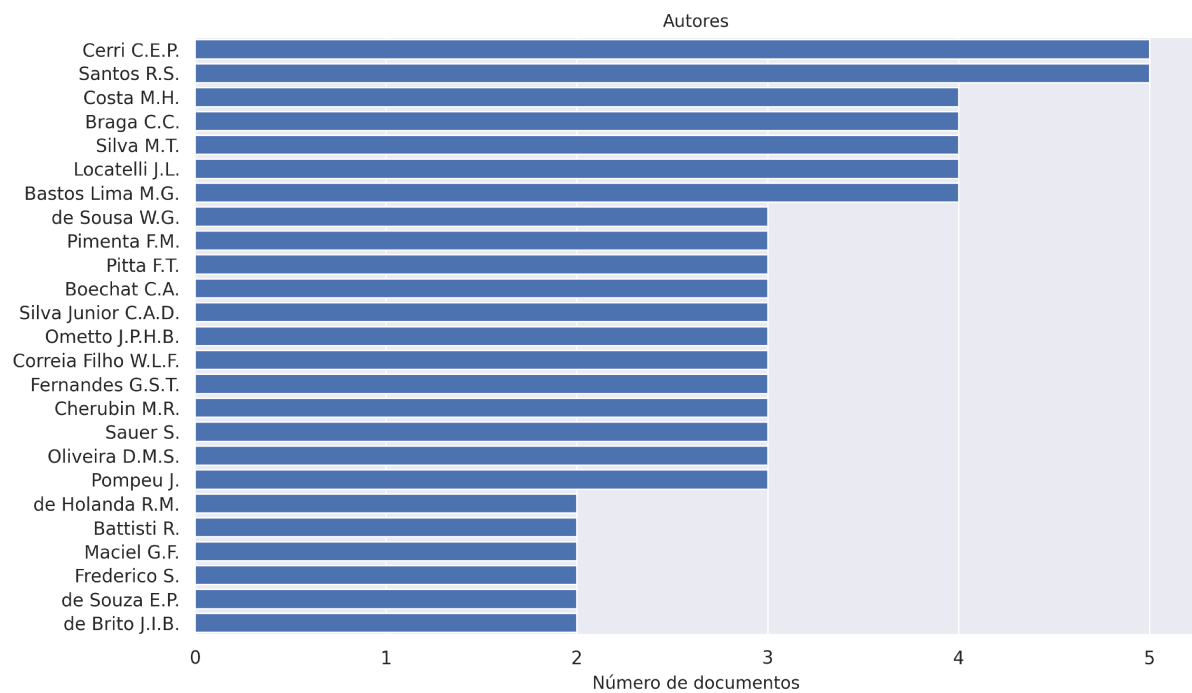


**Fonte:** Dados da pesquisa a partir das informações da plataforma Scopus.

autores avaliaram o impacto da expansão agrícola nas frações dos solos do Matopiba e concluíram que a expansão agrícola resultou na diminuição de carbono e nitrogênio nos solos, implicando na redução da saúde desses solos.

A rede de cocitação obtida com o *VOS Viewer* está apresentada na Figura 2.5. A rede de cocitação identificou quatro grupos distintos. No grupo vermelho, destacou-se Gibbs com 56 citações. No grupo lilás, Sparovek sobressaiu com 42 citações. No grupo em azul, Cerri foi o mais citado com 40 citações, e no grupo em verde, Marengo se destacou

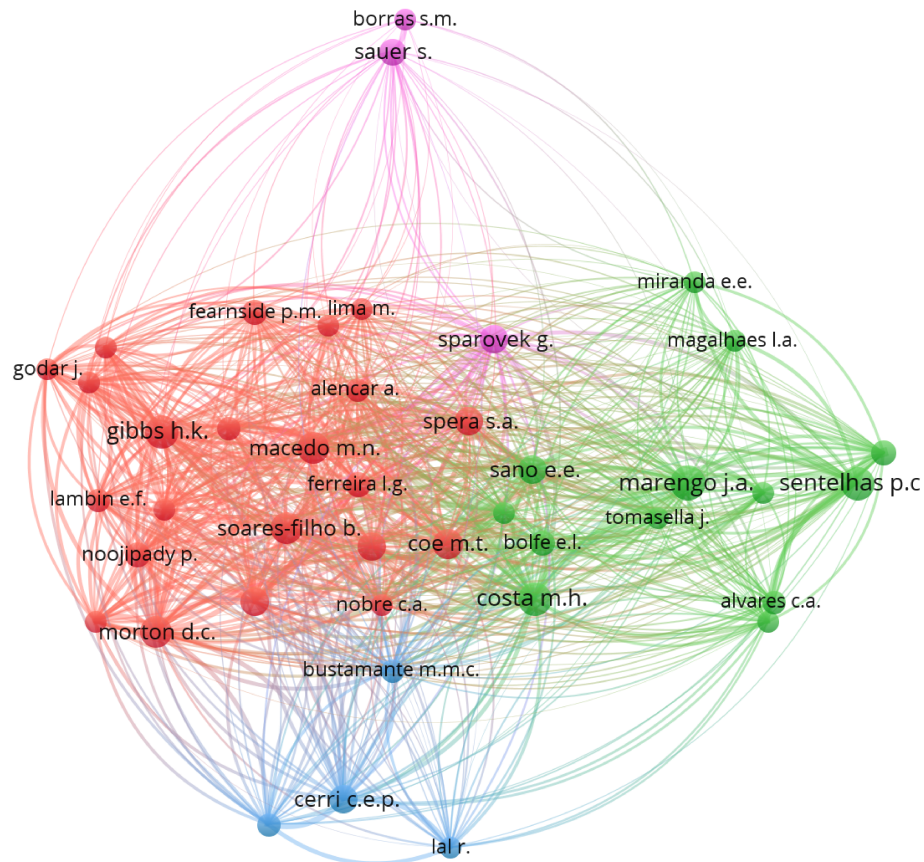
**Figura 2.4** – Autores e número de publicações indexadas no Scopus que abordam o Matopiba.



**Fonte:** Dados da pesquisa a partir das informações da plataforma Scopus.

com 61 citações. A rede de cocitação evidencia os autores que têm maior influência dentro de cada *cluster* e a relação entre os grupos.

**Figura 2.5** – Rede de co-citação dos autores que citaram o Matopiba em seus estudos.



**Fonte:** Dados da pesquisa a partir das informações da plataforma Scopus.

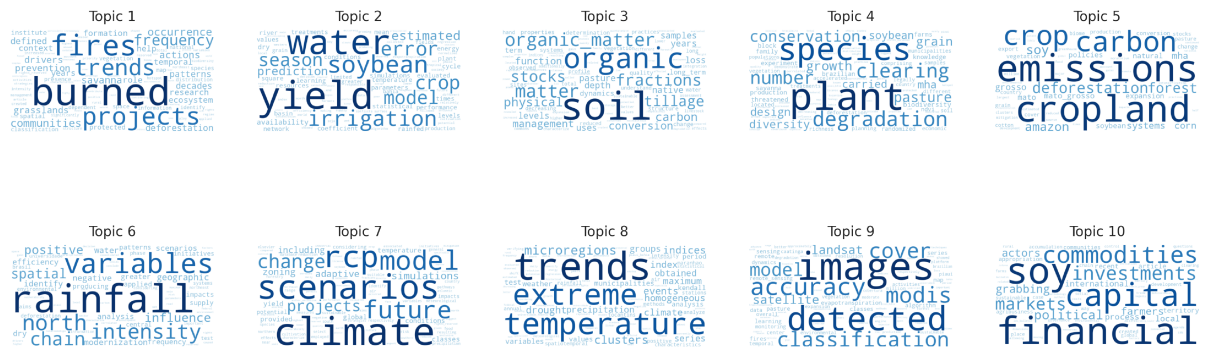
### 2.1.3.1 Principais tópicos abordados nos artigos sobre o Matopiba

Esta seção apresenta o resultado da aplicação da NMF para agrupamento dos documentos de acordo com sua similaridade. Foram escolhidos 10 tópicos (grupos) para visualização dos grupos e o resultado está apresentado na Figura 2.6. As palavras em destaque representam as principais palavras-chave mencionadas nos artigos sobre o Matopiba.

No agrupamento de palavras, foram obtidos 10 grupos (tópicos), que de modo geral estão relacionados às questões ambientais e socioeconômicas presentes no contexto do Matopiba. Esta região, uma das mais recentes fronteiras agrícolas do Brasil, o Matopiba, destaca-se pela produção de grãos amplamente aceitos no mercado externo. Ademais, tem experimentado mudanças significativas no uso e ocupação do solo devido às políticas públicas de fomento ao agronegócio que impulsionaram essas transformações. Diversos estudos discutem os impactos socioambientais resultantes da expansão das atividades agrícolas no Matopiba.

No tópico um, encontram-se algumas palavras em destaque, tais como “*burned*”, “*fires*”, “*projects*”, “*trends*”, e “*frequency*”. O tópico contém temas sobre fenômenos

**Figura 2.6** – Principais palavras no conteúdo dos artigos indexados no Scopus que tratam do Matopiba.



**Fonte:** Dados da pesquisa a partir das informações da plataforma Scopus.

relacionados ao fogo e às queimadas que ocorrem na região do Matopiba. Por exemplo, Milare, Giarolla e Escada (2023) elaborou um indicador de suscetibilidade ao fogo no Matopiba utilizando a análise hierárquica de processos. Já Rocha e Nascimento (2021) analisaram espacialmente focos de queimadas no período de 1998 a 2018 no Matopiba por meio de ferramentas SIG. Finalmente, Silva *et al.* (2020) analisaram os padrões de distribuição de áreas queimadas por meio de imagens de satélite.

No tópico dois, as palavras em maior destaque foram: “*yield*”, “*water*”, “*soybean*”, “*irrigation*”. Os trabalhos desse grupo abordam questões sobre clima, irrigação e recursos ligados à água para a produção de grãos como soja. Por exemplo, Fernandes *et al.* (2022) analisou o impacto das mudanças climáticas na agricultura de sequeiro e irrigada no Matopiba. Silva *et al.* (2018) avaliaram o desempenho do modelo AcquaCrop para diferentes lâminas de irrigação no Matopiba. Pousa *et al.* (2019) realizaram uma análise hidroclimatológica dos recursos hídricos no Matopiba.

O tópico três corresponde ao grupo de artigos que apresentaram as palavras “*soil*”, “*organic*”, “*matter*”, “*organic matter*”, “*fractions*” em destaque. Os artigos do grupo abordaram temas sobre o impacto da expansão agrícola nos solos da região. Locatelli *et al.* (2022) avaliaram o impacto da expansão agrícola nas frações dos solos do Matopiba e concluíram que a expansão agrícola resultou na diminuição de carbono e nitrogênio nos solos, reduzindo assim a saúde dos solos. Gmach *et al.* (2018) analisaram as mudanças no uso da terra e as perdas de carbono da matéria orgânica dos solos para a atmosfera utilizando amostras de solos da região do Matopiba. Santos *et al.* (2022) realizaram uma avaliação qualitativa e quantitativa do carbono extraível com água nos solos do Matopiba.

No tópico quatro, as palavras “*plant*”, “*species*”, “*degradation*”, “*clearing*” e “*number*” ficaram em evidência. Os documentos desse grupo referem-se a estudos associados a plantas, aos aspectos vegetais do Matopiba, às plantas ligadas às atividades agrícolas, ou

às plantas endêmicas do Cerrado. No trabalho de Barbosa-Silva e Antar (2020), os autores relataram uma nova espécie endêmica do Cerrado brasileiro, a *Couepia*, e apontaram estratégias para conservação dessa espécie. Já o estudo de Santana e Simon (2022) compilou dados de espécies de vegetais do Matopiba e concluiu que a diversidade vegetal existente na região é muito variada, mas que apenas 28% das espécies endêmicas e 53% das espécies ameaçadas estão localizadas em áreas de proteção. No artigo de Cardoso, Melo e Ribeiro (2018), os autores estudaram o desempenho da produtividade do feijão-caupi no Matopiba.

No tópico cinco, as palavras “*emissions*”, “*cropland*”, “*carbon*”, “*crop*” e “*deforestation*” destacaram-se. Os artigos neste grupo abordam temas sobre a emissão de carbono, como o estudo de Noojipady *et al.* (2017), que estimou as emissões de carbono em terras agrícolas do Matopiba através de imagens de satélite. No estudo de Escobar *et al.* (2020), os autores quantificaram a emissão de gases na produção e comercialização de produtos agrícolas. No artigo de Coca, Soyer e Jr (2023), os autores analisaram a expansão da produção de soja e milho ao longo dos anos e sua relação com o desenvolvimento e a distribuição de terras nas microrregiões do Matopiba.

No tópico seis, evidenciaram-se as palavras “*rainfall*”, “*variables*”, “*north*”, “*intensity*” e “*chain*”. Em geral, os artigos neste grupo abordam questões climáticas da região, como o estudo de Silva *et al.* (2019), em que os autores identificaram áreas agrícolas mais suscetíveis a erosão e analisaram a intensidade das chuvas. Já no artigo de Trigueiro, Nabout e Tessarolo (2020), os autores avaliaram espacialmente a relação entre o desmatamento no Cerrado e fatores socioeconômicos, ambientais e regionais. No artigo de Reis *et al.* (2020), avaliou-se a evolução de índices de extremos climáticos no Matopiba.

No tópico sete as palavras em destaque foram “*climate*”, “*scenarios*”, “*rcp*”, “*model*” e “*future*”. Os artigos desse grupo discorrem sobre assuntos relacionados a cenários climáticos, projeções futuras no contexto das atividades econômicas do Matopiba e outros temas que envolvem projeções. No artigo de Zilli *et al.* (2020), os autores quantificaram os impactos do uso das terras agrícolas até 2050. No trabalho de Florêncio, Martins e Fagundes (2022), os autores propuseram um zoneamento agroclimático e analisaram o impacto das mudanças climáticas nas áreas indicadas para as plantações de eucalipto do Matopiba. Já no estudo de Lopes *et al.* (2024), os autores também realizaram o zoneamento agroclimático direcionado para a cultura do eucalipto considerando as mudanças climáticas.

O tópico oito apresentou destaque para os termos “*trends*”, “*temperature*”, “*extreme*”, “*microregions*” e “*clusters*”. Os artigos desse grupo abordam questões climáticas, extremos climáticos, seca e temas correlatos. No artigo de Salvador e Brito (2018), os autores analisaram a variação da temperatura no Matopiba utilizando índices de extremos climáticos. Já no estudo de Reis *et al.* (2020), os autores estudaram a evolução de índices

de extremos climáticos e no artigo de Farias *et al.* (2020) avaliou-se a evapotranspiração diária na agricultura do Matopiba.

O tópico nove apresentou destaque às palavras “*images*”, “*detected*”, “*accuracy*”, “*modis*”, “*cover*”. Os artigos abordaram análises do uso e cobertura da terra, utilizando imagens de satélite. Em Luo, Caldas e Yang (2022), os autores mapearam as mudanças no uso e cobertura de uma área de expansão agrícola no Matopiba utilizando imagens de satélite. No artigo de Pletsch *et al.* (2022), os autores desenvolveram uma ferramenta baseada em aprendizado de máquina para detecção de fogo ativo no Matopiba. No estudo de Rodrigues *et al.* (2020), os autores identificaram pivôs centrais de irrigação por meio de imagens de satélite.

Por último, o tópico dez denotou destaque para as palavras “*financial*”, “*soy*”, “*capital*”, “*commodities*” e “*investments*”. De modo geral, os artigos desse tópico analisaram impactos sociais da expansão da agricultura no Matopiba. No artigo de Boechat *et al.* (2023), os autores analisaram o processo de distribuição de terras e da formação histórica do Matopiba. No artigo de Fernandes, Frederico e Pereira (2022), os autores estudaram a influência do capital financeiro na agricultura do Matopiba. Já no trabalho de Calmon (2022), os autores propõem mudanças nas formas de apropriação de terra, na administração e na definição do espaço de fronteiras agrícolas, utilizando o caso do Matopiba como exemplo.

De forma geral, os tópicos ou agrupamentos abordaram os impactos ambientais e socioeconômicos decorrentes da intensificação das atividades agropecuárias no Matopiba. No entanto, os estudos que explicitassem a sustentabilidade agroambiental ou a sustentabilidade em sistemas agrícolas ainda são incipientes na região. Apenas em Arcoverde *et al.* (2023), os autores propuseram indicadores de sustentabilidade para os biomas do Cerrado e da Caatinga considerando a perspectiva Nexus e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030.

No contexto desta pesquisa, que se propõe a avaliar aspectos da sustentabilidade agroambiental na região do Matopiba, não foram encontrados artigos diretamente relacionados a essa temática. Embora alguns tópicos estejam conectados a esses aspectos, conforme ilustrado na Figura 2.6, poucas publicações os mencionaram. Isso evidencia uma lacuna significativa de estudos que utilizam e investigam este conceito aplicado ao Matopiba.

#### 2.1.4 Conclusão

A revisão bibliométrica sobre os estudos sobre o Matopiba foi realizada a partir de uma ferramenta metodológica de análise bibliométrica aplicada a um conjunto de dados

composto por 116 artigos publicados até abril de 2024, disponíveis na base de dados do Scopus. Os resultados apontaram uma diversidade de tópicos de estudo no contexto do Matopiba, incluindo análises de incêndios, uso de água e irrigação, espécies de plantas, emissão de carbono e mudanças climáticas. No entanto, observou-se a ausência de artigos que abordem a sustentabilidade agroambiental, um dos temas abordados no Plano de Desenvolvimento Agropecuário, segundo o Decreto 11.767/2023. Esse fato evidencia uma lacuna significativa na literatura e justifica a necessidade de investigar o tema.

Embora a base de dados Scopus ter sido indicada como mais robusta para utilização do pacote *litstudy*, devido a extensa variedade de informações disponíveis sobre as publicações (Heldens *et al.*, 2022), denotou-se uma limitação da análise realizada neste trabalho sobre o Matopiba. Diversos trabalhos sobre o Matopiba não estão indexados na base de dados Scopus; há muitos artigos nacionais na base de dados do Google Scholar. No entanto, extrair metadados do Google Scholar ainda é um desafio, especialmente considerando ferramentas de busca avançadas como as disponibilizadas no Scopus. Uma alternativa para aprimorar o estudo é associar as bases de dados do Scopus e Web of Science.

## 2.2 Revisão bibliométrica sobre análise multicritério *fuzzy* aplicada ao estudo da sustentabilidade

Nas últimas décadas, a sustentabilidade tornou-se um princípio estruturante para o planejamento de políticas públicas e estratégias de desenvolvimento em escala global. No campo agroambiental, essa noção demanda uma abordagem integrada dos impactos das atividades agrícolas sobre os ecossistemas e a sociedade, exigindo métodos capazes de considerar simultaneamente variáveis ambientais, econômicas e sociais Opon e Henry (2020). A sustentabilidade agroambiental, nesse contexto, pode ser compreendida como a capacidade dos sistemas produtivos agrícolas de manter a integridade dos recursos naturais e ecossistêmicos, ao mesmo tempo em que promove equidade social e viabilidade econômica. Essa abordagem distingue-se da sustentabilidade agrícola estritamente produtivista por incorporar explicitamente fatores como biodiversidade, qualidade do solo e da água e justiça ambiental no uso da terra Valizadeh e Hayati (2021).

Dada a complexidade dos sistemas agroambientais e a multiplicidade de critérios envolvidos, ferramentas analíticas que apoiem a tomada de decisão em contextos de incerteza são cada vez mais demandadas. A Análise de Decisão Multicritério (MCDA, do inglês Multi-Criteria Decision Analysis) tem se destacado como um dos métodos mais apropriados para lidar com essas situações, permitindo integrar diferentes critérios,

inclusive de natureza qualitativa, em processos decisórios transparentes e sistematizados Opon e Henry (2020). Entre as abordagens multicritério, a MCDA baseada em lógica fuzzy tem ganhado destaque por sua capacidade de tratar incertezas, subjetividades e dados imprecisos, frequentemente presentes em avaliações ambientais e processos participativos. Ao incorporar os princípios da teoria dos conjuntos fuzzy, esse método permite uma representação mais realista dos julgamentos humanos e das ambiguidades inerentes às decisões sustentáveis Jang, Sun e Mizutani (1997), Malczewski (2006), Pacheco *et al.* (2024). Sua aplicação tem sido documentada em áreas como gestão de resíduos, mobilidade urbana, cadeias de suprimento, energia e, em menor grau, na avaliação da sustentabilidade de sistemas agrícolas.

Apesar do crescente uso da MCDA fuzzy em diversos campos da sustentabilidade, observa-se uma lacuna importante na literatura no que se refere à sua aplicação no contexto da sustentabilidade agroambiental. A produção científica mostra-se ainda dispersa, com escassa sistematização e poucos trabalhos que associam diretamente essas abordagens. Esse cenário limita tanto a consolidação teórica do campo quanto a formulação de ferramentas metodológicas mais robustas para orientar decisões em políticas agrícolas sustentáveis.

Diante da incipiente integração entre a análise multicritério fuzzy (MCDA fuzzy) e a sustentabilidade agroambiental, esta seção tem como objetivo mapear a produção científica que articula essas duas abordagens, com ênfase na identificação de autores-chave, instituições, redes de colaboração, temas centrais e lacunas persistentes na literatura. Ao sistematizar o estado da arte, o estudo busca não apenas contribuir para o amadurecimento teórico e metodológico do campo, mas também fornecer subsídios técnicos à formulação de políticas públicas.

A análise bibliométrica tem-se consolidado como um instrumento robusto de síntese e interpretação do conhecimento científico, permitindo a identificação de tendências emergentes, padrões colaborativos e campos em consolidação Araya-Muñoz *et al.* (2017). Por sua objetividade e capacidade de mapear evidências de forma sistemática, a bibliometria contribui diretamente para orientar futuras investigações e apoiar processos decisórios em escala institucional e territorial Kitchenham e Charters (2007), Pacheco *et al.* (2024).

### 2.2.1 Coleta dos conjuntos de dados

A pesquisa dos artigos publicados considerou periódicos das subáreas de ciências ambientais, ciências da terra, sociais e agricultura. Os artigos selecionados mencionavam no título e no resumo as palavras associadas a *multicriteria* ou *decision making* e

*sustainability*. Especificamente, utilizou-se o seguinte termo de busca: *TITLE-ABS ( ( multi\* W/1 criter\* ) AND ( decision AND mak\* ) ) AND TITLE-ABS ( sustainability ) AND ( LIMIT-TO ( SRCTYPE,"j" ) AND ( LIMIT-TO ( DOCTYPE,"ar" ) ) AND ( LIMIT-TO ( SUBJAREA,"EART" ) OR LIMIT-TO ( SUBJAREA,"ENVI" ) OR LIMIT-TO ( SUBJAREA,"AGRI" ) OR LIMIT-TO ( SUBJAREA,"SOCI" ) ) AND ( EXCLUDE ( EXACTSRCTITLE,"Sustainability Switzerland" ) ) AND ( LIMIT-TO ( LANGUAGE,"English" ) OR LIMIT-TO ( LANGUAGE,"Portuguese" ) OR LIMIT-TO ( LANGUAGE,"Spanish" ) )*.

No termo *TITLE-ABS ( ( multi\* W/1 criter\* )*, consideram-se palavras iniciadas com *multi* com uma palavra de distância de palavras iniciadas com *criter*. Assim, esta busca engloba termos como *multi-criteria* e *multiple-criteria*, por exemplo. Uma ideia similar é aplicada ao termo *decision AND mak\**, em que as palavras iniciadas com *mak* são buscadas, por exemplo, *making* e *makers*. Além disso, a busca limitou-se a artigos de periódicos nas áreas descritas anteriormente.

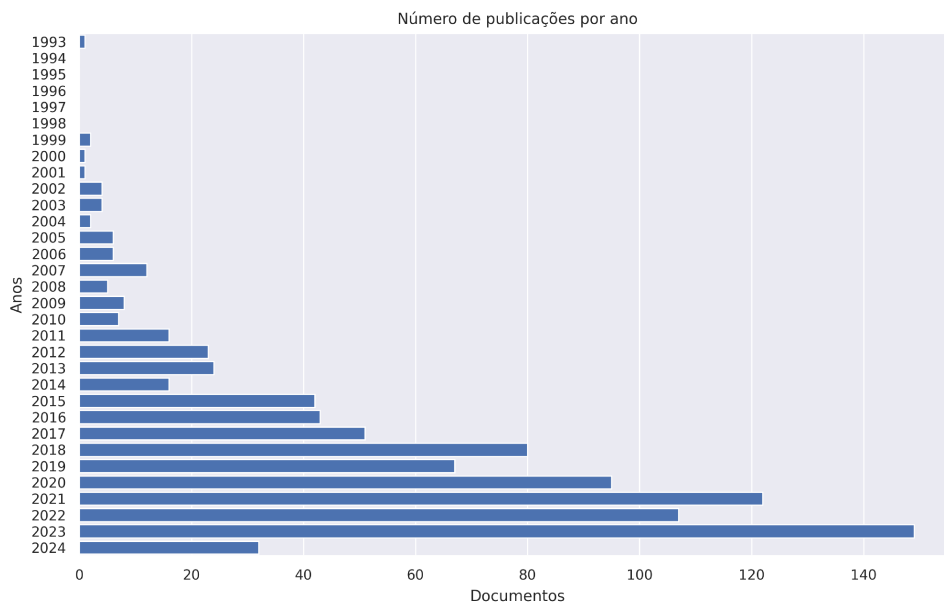
Nesta etapa optou-se por excluir artigos do periódico *Sustainability Switzerland* da editora MDPI. Conforme discutido por Oviedo-García (2021), o estudo conduzido por Copiello (2019) apontou práticas predatórias do periódico *Sustainability* a partir da análise de autocitações de periódicos e autocitações de editores publicadas na revista. O estudo sugeriu uma forma de má conduta pós-produção, devido à manipulação de citações. Foi observado que as autocitações, em 2016 e 2017, relativas aos artigos publicados em 2015, não correspondiam a uma distribuição de probabilidade uniforme, indicando um padrão anormal de autocitações. O autor sugeriu que esta prática pode ter sido adotada para inflar o fator de impacto do periódico, mas ressaltou que mais estudos devem ser realizados para definir o limite de autocitações considerado normal. Finalmente, a busca foi limitada a artigos publicados nas línguas inglesa, portuguesa e espanhola.

### 2.2.2 Resultados e discussão

A busca realizada de acordo com o termo descrito na Seção 2.2.1 resultou em 926 artigos. A produção científica anual está apresentada na Figura 2.7 e mostrou variações no crescimento e decréscimo das publicações entre 1993 e 2024. O ápice de publicações ocorreu em 2023, com 149 artigos. Nos primeiros cinco anos (1993–1998), houve apenas uma publicação, enquanto nos últimos cinco anos (2019–2024) foram publicados 572 artigos.

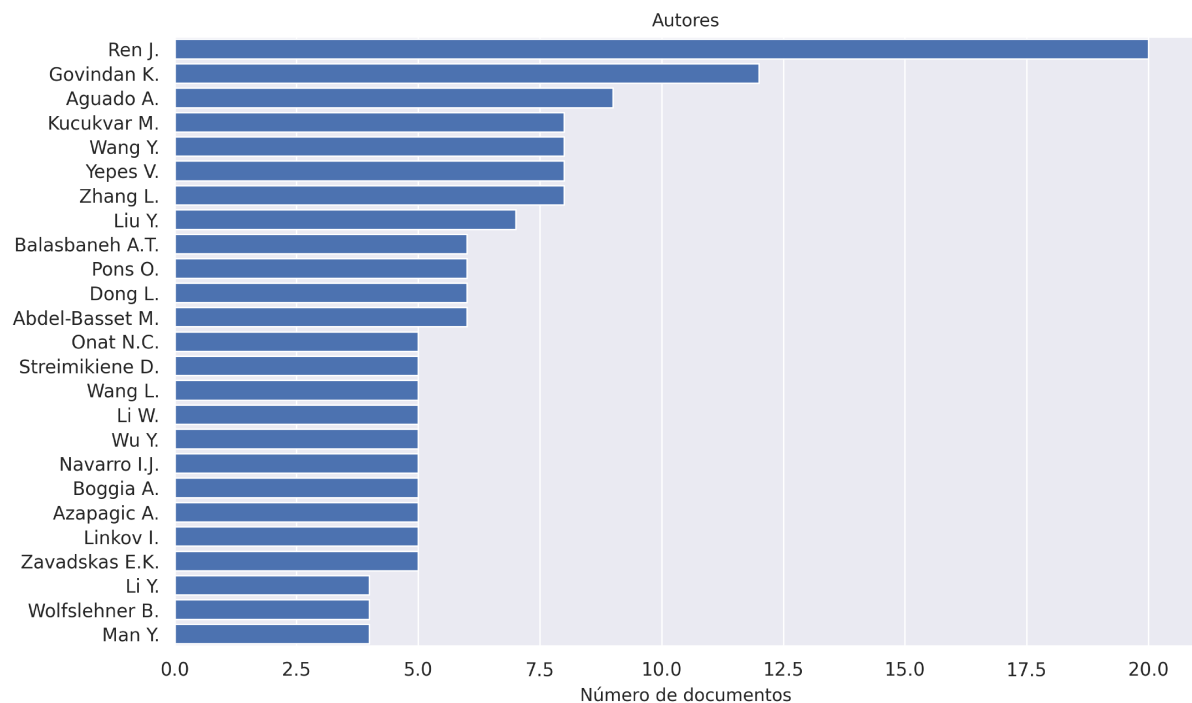
A Figura 2.8 apresenta o número de publicações por autor. Os autores com maior número de publicações foram Ren J., com 20 artigos publicados, seguidos pelos pesquisadores Govindan K. e Aguado A.

**Figura 2.7** – Produção científica anual de publicações indexadas no Scopus que abordam estudos de sustentabilidade.



**Fonte:** Dados da pesquisa a partir das informações da plataforma Scopus.

**Figura 2.8** – Autores e número de publicações indexadas no Scopus que abordam estudos de sustentabilidade.

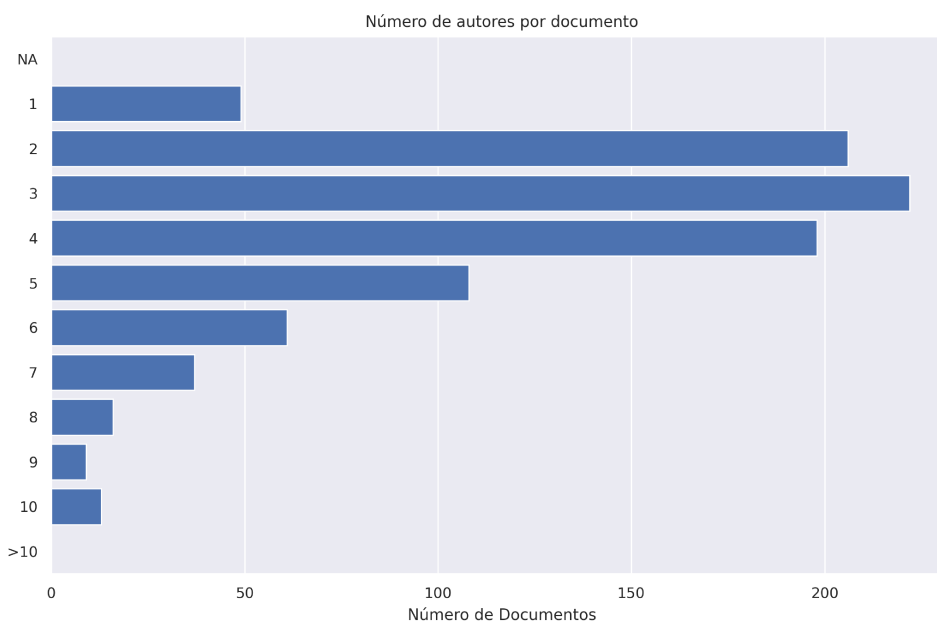


**Fonte:** Dados da pesquisa a partir das informações da plataforma Scopus.

A Figura 2.9 apresenta o número de autores por artigo. O número de autores por publicação foi majoritariamente três autores por artigo, seguido de artigos com dois e quatro autores. Cerca de 50 artigos com apenas um autor e também foram encontrados

artigos com até 10 autores.

**Figura 2.9** – Número de autores em publicações indexadas no Scopus que abordam estudos de sustentabilidade.

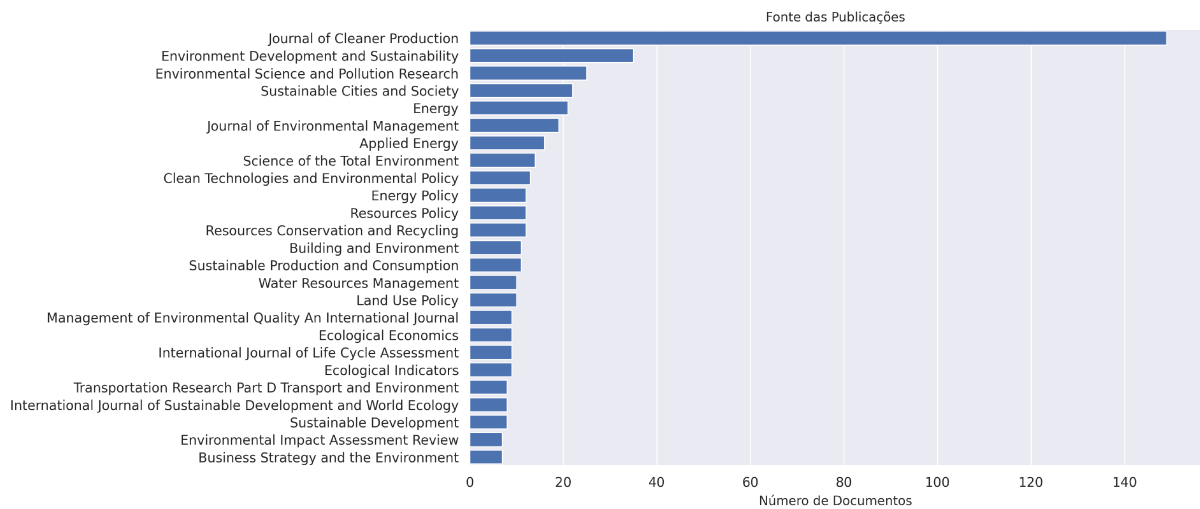


**Fonte:** Dados da pesquisa a partir das informações da plataforma Scopus.

A Figura 2.10 apresenta o número de publicações por periódico. O periódico *Journal of Cleaner Production* da editora Elsevier publicou mais de 100 artigos abordando os temas da busca. O periódico foca em discussões teóricas e práticas sobre produção limpa, questões ambientais e de sustentabilidade. Outro periódico de destaque foi o *Environment, Development and Sustainability*, da editora Springer, uma revista internacional multidisciplinar que concentra publicações em assuntos sobre impactos ambientais e desenvolvimento social e econômico.

Em relação aos artigos, as áreas de pesquisa com destaque no volume de publicações foram a Ambiental, Engenharia, Ciências Sociais e Energia. O artigo mais citado, com 425 citações, de autoria Santoyo-Castelazo e Azapagic (2014), abordou o problema dos sistemas energéticos no cenário do desenvolvimento sustentável. Os autores desenvolveram uma estrutura de suporte à decisão para avaliar a sustentabilidade de sistemas energéticos, considerando os aspectos sociais, ambientais e econômicos, e aplicaram o modelo para o sistema elétrico do México. Nesse estudo, os autores identificaram a complexidade das decisões no setor energético devido à diversidade de critérios e às preferências relacionadas à sustentabilidade.

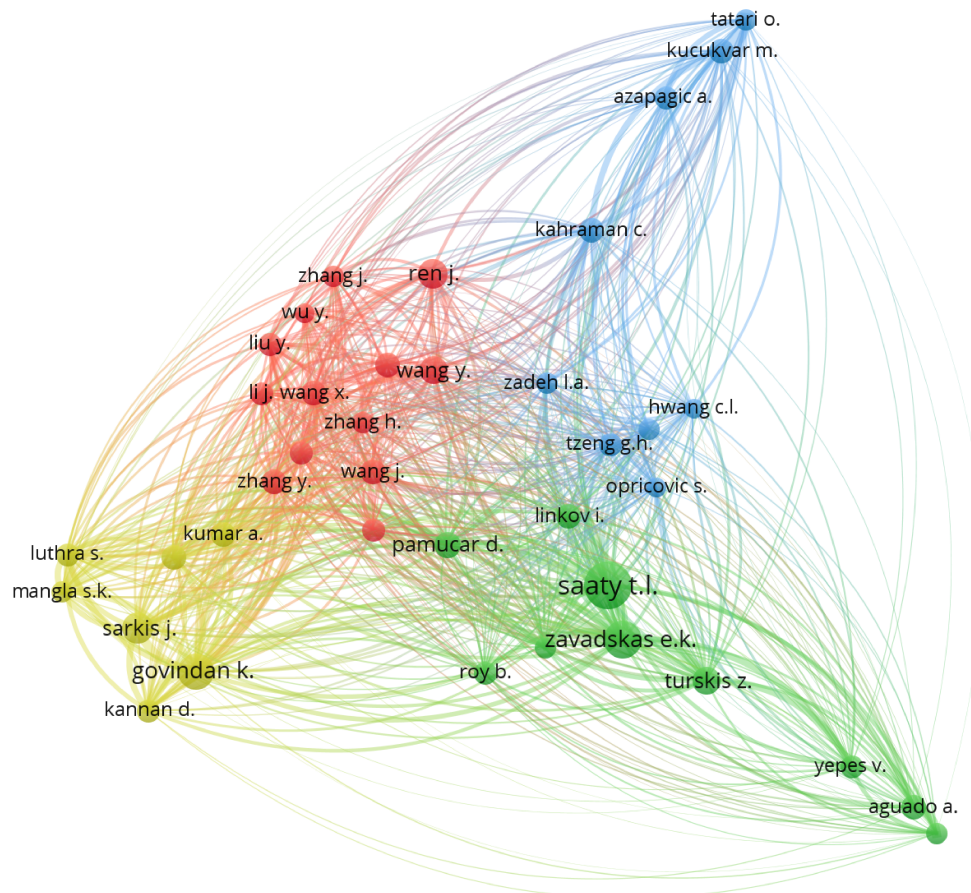
**Figura 2.10** – Número de publicações por periódico em publicações indexadas no Scopus que abordam estudos de sustentabilidade.



**Fonte:** Dados da pesquisa a partir das informações da plataforma Scopus.

A Figura 2.11 apresenta a rede de cocitação da busca em questão. A rede de cocitação apresentou quatro clusters, ilustrados por cores diferentes na figura. No cluster em vermelho, destaca-se o autor Ren. J., com 226 citações. No cluster em verde, o autor Saaty T. L. destacou-se com 550 citações. No cluster em azul, Kahraman C. foi o mais citado, com 152 citações, enquanto no cluster amarelo, o autor Govindan K. teve 330 citações. Um ponto relevante é que o autor Saaty é o principal desenvolvedor da técnica de Análise Hierárquica de Processos (AHP), o que justifica o maior número de citações em comparação com os demais autores.

**Figura 2.11** – Rede de co-citação dos autores que abordaram técnicas de MCDA para estudos de sustentabilidade



**Fonte:** Dados da pesquisa a partir das informações da plataforma Scopus.

### 2.2.2.1 Principais tópicos abordados nos artigos sobre sustentabilidade

Para uma melhor compreensão dos assuntos abordados nos artigos, foram analisados os principais tópicos por meio da geração de agrupamentos de palavras. Foram obtidos 10 grupos de palavras, com destaque para a palavra mais frequente em cada grupo. Os tópicos dos agrupamentos revelaram diversas palavras e conceitos na discussão acerca da sustentabilidade, análise multicritério e sistemas *fuzzy*. De maneira geral, os assuntos que mais se destacaram incluem as áreas de aplicação da MCDA e sustentabilidade, como avaliação e suporte em escolhas de técnicas agrícolas, de abastecimento, de construção, de energia, de transporte, dentre outras.

No tópico um as palavras mais frequentes foram “*land*”, “*suitable*”, “*agricultural*”, “*crop*”, “*areas*”. Os trabalhos do grupo um, em geral, trataram de problemas de decisão na localização de plantio de culturas considerando a sustentabilidade em sistemas agrícolas, como os artigos de Moisa *et al.* (2022), Ali *et al.* (2020), Widiatmaka (2016).

No tópico dois destacaram-se as palavras “*supplier*”, “*remediation*”, “*selection*”,

“fuzzy”, “technologies”. Os artigos desse tópico dissertaram sobre a análise multicritério no auxílio à tomada de decisão na escolha de fornecedores sob a perspectiva da sustentabilidade, como nos trabalhos de Menon e Ravi (2022), Kellner e Utz (2019), Sinha e Anand (2018).

**Figura 2.12** – Principais palavras no conteúdo dos artigos



**Fonte:** Dados da pesquisa a partir das informações da plataforma Scopus.

O tópico três evidenciou destaque para as palavras, “*projects*”, “*stakeholders*”, “*methodology*”, “*mcd*”, “*community*”. Os artigos do tópico três trataram da busca de melhores escolhas para projetos de construção com menor impacto ambiental, com o objetivo de fomentar construções sustentáveis, e, para isso, utilizaram a análise multicritério, como nos artigos de Passoni *et al.* (2021), Sarkis (2006), Figueiredo *et al.* (2021).

No tópico quatro destacaram-se “*transportation*”, “*urban*”, “*city*”, “*planning*”, “*freight*”, os artigos trataram sobre problemas urbanos de transporte, planejamento e utilizaram análise multicritério para auxiliar na tomada de decisão objetivando alternativas mais sustentáveis, como os trabalhos de Jeon, Amekudzi e Guensler (2010), Flores *et al.* (2021), Oses *et al.* (2018).

No tópico cinco as palavras “*manufacturing*”, “*green*”, “*fuzzy*”, “*industry*”, “*factors*” apresentaram destaque. O tópico reuniu artigos que abordaram as práticas de inovação verde na indústria, especificamente o uso da análise multicritério para avaliar a sustentabilidade na indústria, como os artigos de Wang e Yang (2021), Keshavarz-Ghorabae *et al.* (2019), Saxena *et al.* (2021).

O tópico seis apontou as palavras “*chain*”, “*supply*”, “*supply chain*”, “*barriers*”, “*risk*” com maior frequência. No tópico seis, os artigos abordaram propostas de cadeias de abastecimento sustentáveis, utilizando a análise multicritério fuzzy, como os trabalhos de Erol, Sencer e Sari (2011), Abdel-Basset e Mohamed (2020), Rafigh *et al.* (2021).

No tópico sete destacaram as palavras, “*energy*”, “*power*”, “*electricity*”, “*wind*”, “*renewable*”; os artigos desse tópico discutiram sobre o processo de transformação das bases energéticas para energias sustentáveis que geram maiores impactos ambientais, utilizando como exemplo o caso de alguns países para auxiliar na discussão. Autores utilizaram

a análise multicritério para oferecer um suporte a escolhas mais sustentáveis, como os trabalhos de Volkart *et al.* (2017), Jovanovic *et al.* (2011), Adun (2023).

Os artigos do tópico oito denotaram as palavras, “*waste*”, “*treatment*”, “*technologies*”, “*wastewater*”, “*landfill*”. Nos artigos desse grupo, os autores abordaram temas sobre a gestão de resíduos e utilizaram a análise multicritério para a tomada de decisão, como nos artigos de Hezam *et al.* (2023), Stefanović *et al.* (2016), Haydar (2023).

Nos artigos do tópico nove as palavras, “*forest*”, “*water*”, “*forestry*”, “*sfm*”, “*management*” apresentaram destaque. Os trabalhos relataram sobre temas como manejo sustentável de florestas, avaliação da suscetibilidade das florestas ao fogo, análise do uso sustentável de florestas etc. Os artigos utilizaram a análise multicritério como ferramenta de suporte à decisão, como os artigos de Mendoza e Prabhu (2000), Sari (2021), Anuradha e Gupta (2022).

E por fim, o tópico dez que denotou destaque nas palavras “*building*”, “*construction*”, “*design*”, “*materials*”, “*life cycle*” e reuniu artigos que discutiram as melhores escolhas nos processos de renovação e construção sustentável de edifícios para isso utilizaram a análise multicritério, como os artigos de Sarkis (2006), Figueiredo *et al.* (2021), Passoni *et al.* (2021).

Os artigos abordaram temas de diversas áreas, evidenciando a multidimensionalidade da sustentabilidade. A maioria dos trabalhos utilizou a análise multicritério para guiar melhores escolhas visando alcançar a sustentabilidade. No entanto, poucos artigos abordaram as incertezas na aplicação da análise multicritério ou utilizaram métodos para tratá-las. Entre os que trataram das incertezas, métodos *fuzzy* foram empregados para reduzir essas incertezas. Diante disso, uma nova busca foi realizada para analisar a produção científica sobre MCDA *fuzzy* para sustentabilidade, a qual será apresentada na próxima seção (Seção 3.3).

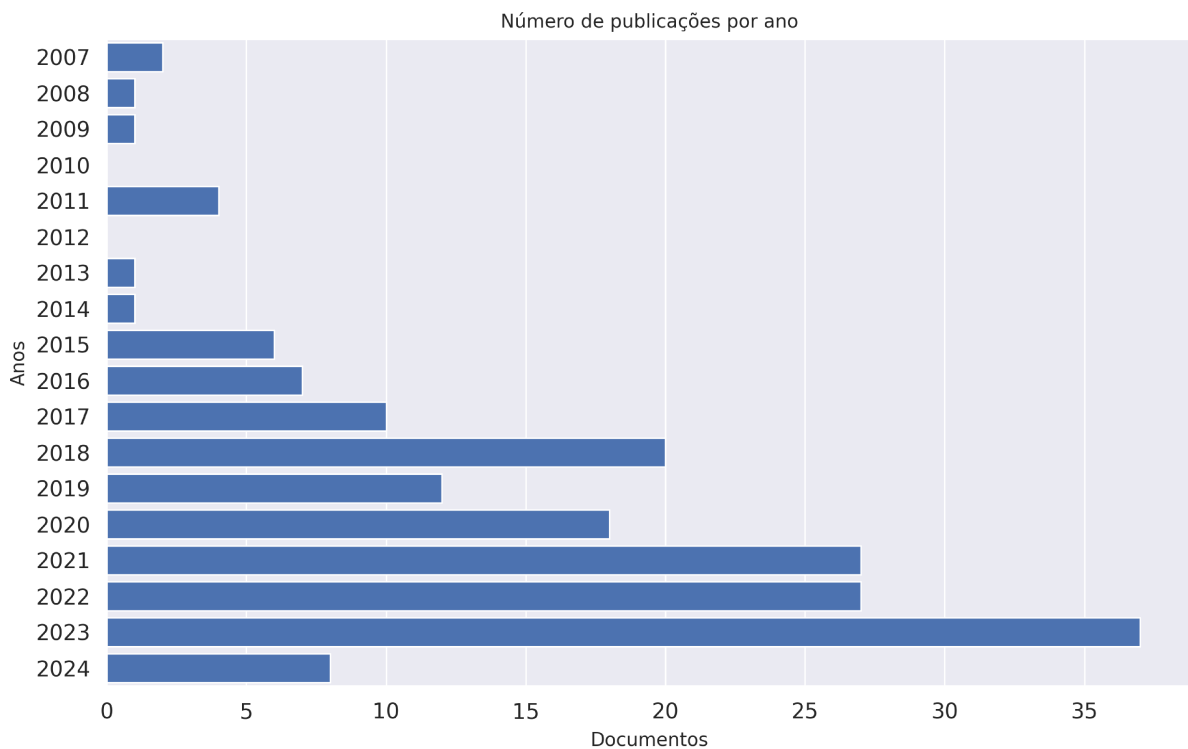
#### 2.2.2.2 Análise bibliométrica sobre MCDA *fuzzy* para sustentabilidade

Para analisar o impacto da produção científica em temas sobre sustentabilidade e análise multicritério *fuzzy* foi realizada uma busca na plataforma Scopus por meio do termo: *TITLE-ABS ( ( multi\* W/1 criter\* ) AND ( decision AND mak\* ) ) AND TITLE-ABS ( sustainability ) AND TITLE-ABS ( fuzzy ) AND ( LIMIT-TO ( SRCTYPE, "j" ) ) AND ( LIMIT-TO ( DOCTYPE, "ar" ) ) AND ( LIMIT-TO ( SUBJAREA, "EART" ) OR LIMIT-TO ( SUBJAREA, "ENVI" ) OR LIMIT-TO ( SUBJAREA, "AGRI" ) OR LIMIT-TO ( SUBJAREA, "SOCI" ) ) AND ( EXCLUDE ( EXACTSRCTITLE, "Sustainability Switzerland" ) ) AND ( LIMIT-TO ( LANGUAGE, "English" ) OR LIMIT-TO ( LANGUAGE, "Portuguese" ) OR LIMIT-TO ( LANGUAGE, "Spanish" ) )*. O termo de busca

selecionou artigos das áreas, ambiental, agrícola e social que apresentaram no título e no resumo os temas sobre sustentabilidade e análise multicritério fuzzy.

O termo de busca resultou em 182 artigos publicados entre 2007 e 2024. As primeiras publicações da base de dados que abordavam simultaneamente a análise multicritério, *fuzzy* e sustentabilidade ocorreram no ano de 2007. As publicações nos primeiros seis anos da análise, entre 2007 e 2012, denotaram períodos com ausência de publicações de artigos; ainda assim, foram registrados oito artigos na temática. Nos anos finais da análise, entre 2020 e 2024, foi denotado um volume maior de artigos publicados, totalizando 117 publicações, sendo o ano de 2023 o período com mais artigos publicados, somando 37 publicações. O periódico com mais destaque quanto ao número de publicações foi *Journal of Cleaner Production*.

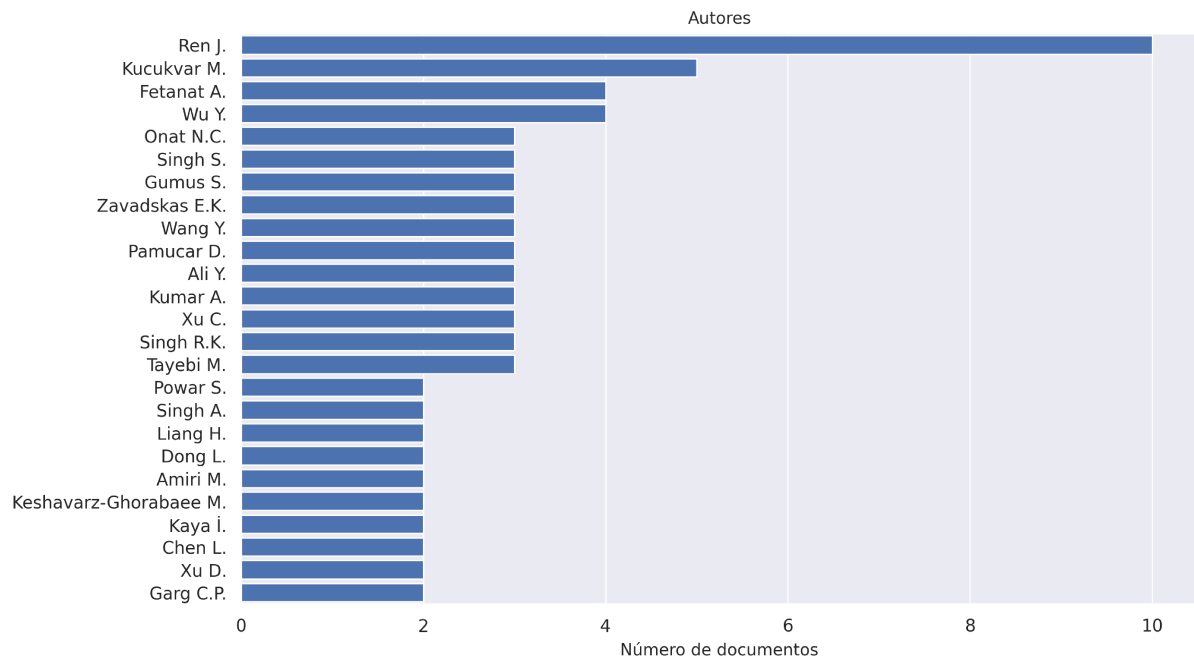
**Figura 2.13** – Produção científica anual de publicações indexadas no Scopus que abordam a Sustentabilidade e MCDA *fuzzy*.



**Fonte:** Dados da pesquisa a partir das informações da plataforma Scopus.

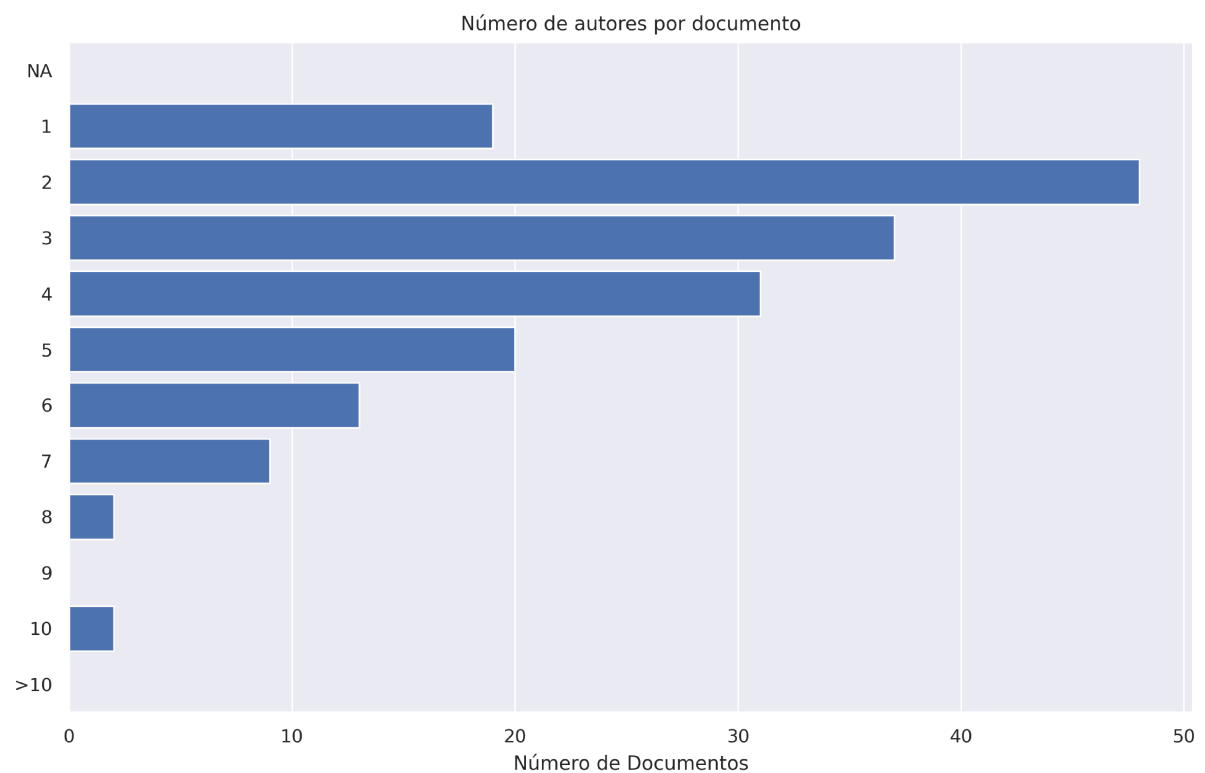
As áreas da pesquisa das publicações foram, em sua maioria, da área das ciências ambientais, com 145 artigos (29,2%), seguidas da área da engenharia com 88 artigos (17,7%). As publicações, em sua maioria, ocorreram em autoria de dois autores por artigo. O autor com maior número de publicações na temática foi o Jingzheng Ren, com dez publicações que abordaram a análise multicritério, *fuzzy* e sustentabilidade. O artigo mais citado do autor Jingzheng Ren, (Ren e Lützen, 2015), trata de uma proposta metodológica de decisão multicritério *fuzzy* para avaliar escolhas de tecnologias mais sustentáveis para

**Figura 2.14** – Autores e número de publicações indexadas no Scopus que abordam a Sustentabilidade e MCDA *fuzzy*.



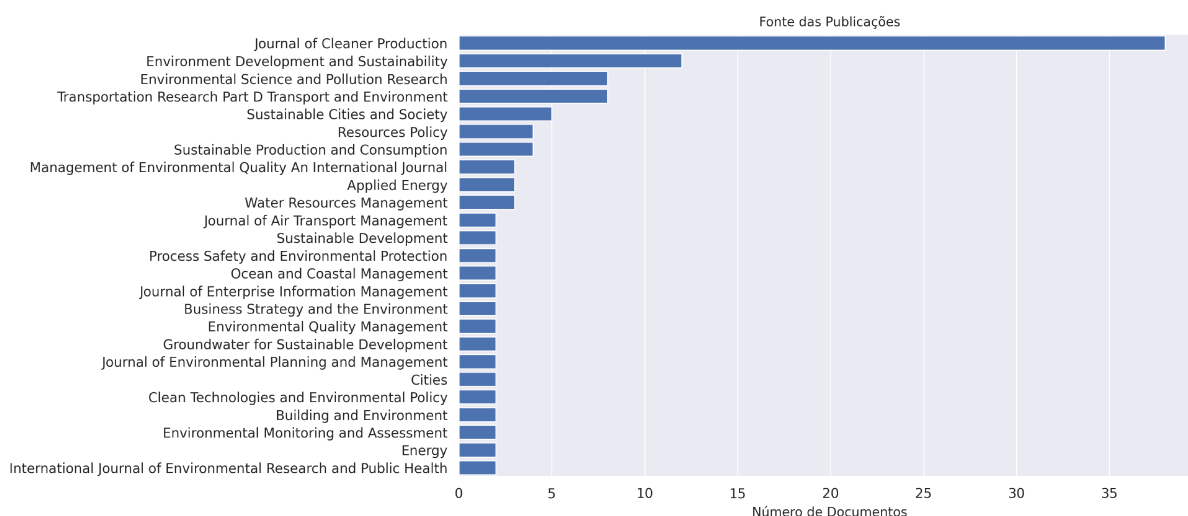
**Fonte:** Dados da pesquisa a partir das informações da plataforma Scopus.

**Figura 2.15** – Número de autores em publicações indexadas no Scopus que abordam a Sustentabilidade e MCDA *fuzzy*.



**Fonte:** Dados da pesquisa a partir das informações da plataforma Scopus.

**Figura 2.16** – Periódicos e número de publicações.



**Fonte:** Dados da pesquisa a partir das informações da plataforma Scopus.

redução na emissão de gases poluentes por navios, considerando incertezas provenientes de dados incompletos, como resultado os autores e concluíram que a metodologia proposta era capaz de fornecer suporte aos tomadores de decisão para escolhas mais sustentáveis.

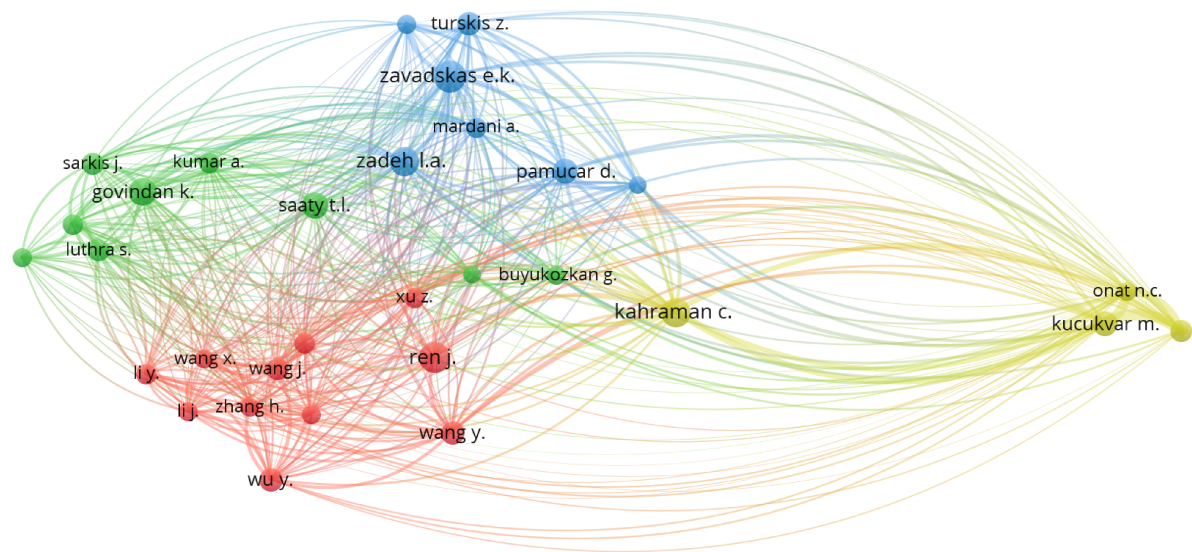
No geral, o artigo mais citado, com 320 citações, foi de autoria de Guo e Zhao (2015). Os autores utilizaram a análise multicritério *fuzzy* como ferramenta de auxílio na seleção do melhor lugar para localização de estação de carregamento de veículos elétricos na perspectiva da sustentabilidade.

A rede da produção científica dos pesquisadores é representada na Figura 2.17, onde se denotaram quatro núcleos. A rede de cocitação evidenciou maior proximidade entre os autores do núcleo em vermelho, azul e verde; os autores do *cluster* em amarelo encontram-se em um núcleo mais distanciado, mas ainda assim estão interligados. No *cluster* em vermelho, Ren J. apresentou o maior número de citações com 116 citações; no *cluster* de cor verde, Govindan K. destacou-se com 94 citações. O *cluster* em azul, o autor Zavadskas e. k., apresentou destaque com 126 citações e, por fim, o *cluster* em amarelo, que o autor Kahraman C. obteve o maior número, com 104 citações.

### 2.2.2.3 Análise dos principais tópicos abordados sobre técnicas de MCDA *fuzzy* para estudos de sustentabilidade

Os agrupamentos temáticos resultantes da análise dos artigos geraram 10 tópicos com palavras-chave e assuntos similares. No Tópico 1, destacaram-se os termos “*transport*”, “*freight*”, “*project*”, “*public*” e “*building*”. Este grupo reuniu estudos que abordam transportes de cargas e construções, como o de Ma *et al.* (2022), no qual os autores examinaram a sustentabilidade de planos de transporte vertical na mineração marítima utilizando

**Figura 2.17** – Rede de co-citação dos autores que abordaram técnicas de MCDA *fuzzy* para estudos de sustentabilidade.



**Fonte:** Dados da pesquisa a partir das informações da plataforma Scopus.

a análise de rede fuzzy. Já o artigo de Keshavarz-Ghorabae *et al.* (2021) analisou a sustentabilidade do transporte público em Teerã, empregando a análise multicritério na tomada de decisão. Por fim, em Kumar e Anbanandam (2020), as práticas de transporte de mercadorias também foram avaliadas com o uso de métodos de decisão multicritério.

**Figura 2.18** – Principais palavras no conteúdo dos artigos.



**Fonte:** Dados da pesquisa a partir das informações da plataforma Scopus.

No tópico dois destacaram-se as palavras “energy”, “electricity”, “vehicles”, “renewable”, “cycle”; os artigos do grupo abordaram assuntos acerca de problemas relacionados a fontes de energia, carregamento de veículos elétricos, como o trabalho de Temel, Kentel e Alp (2023), que propôs um índice ambiental para contribuir para políticas energéticas provenientes das usinas hidrelétricas por meio da abordagem NEXUS e da análise multicritério difusa. O artigo dos Zhao *et al.* (2022) identificou a influência das alternativas da cultura energética em países de economia emergente para investimentos em energia

sustentável. O artigo dos autores Altintas e Utlu (2021) utilizou a análise multicritério como suporte à decisão na escolha de alternativas para gestão de energia.

No tópico três destacaram-se as palavras “*waste*”, “*circular*”, “*circular economy*”, “*economy*”, “*disposal*”; os artigos, no geral, trataram de gestão sustentável de resíduos. Os artigos dos autores Fetanat, Tayebi e Shafipour (2021) propuseram a elaboração de um indicador multidimensional para avaliar a sustentabilidade na gestão de resíduos com base na economia circular. Para isso, os autores utilizaram uma abordagem difusa com a integração de rede analítica *fuzzy*. Já o artigo dos autores Mor e Ramachandran (2017) discutiu a questão dos resíduos não biodegradáveis e aplicou a análise multicritério para tomada de decisão por meio da ferramenta TOPSIS. O artigo dos autores Khan e Ali (2022) propôs uma estrutura para inserção de princípios da economia circular na gestão de resíduos no Paquistão e, para isso, utilizou a análise multicritério.

Os artigos do tópico quatro notabilizaram as palavras “*supplier*”, “*resilient*”, “*companies*”, “*selection*”, “*best*”. Eles abordaram temas relacionados à escolha de fornecedores mais sustentáveis, como os artigos dos autores Agarwal e Nishad (2024), que utilizaram a decisão multicritério considerando o conceito de resiliência na sustentabilidade tridimensional (ambiental, econômica e social) e *fuzzy MCDM* para auxiliar na escolha dos fornecedores. No artigo de Hailiang *et al.* (2023), elaboraram um índice para indicar fornecedores sustentáveis por meio da metodologia *fuzzy*. Já o artigo de Souza *et al.* (2024) utilizou uma abordagem *fuzzy* linguística para orientar na escolha do fornecedor mais sustentável.

No tópico cinco, as palavras “*technologies*”, “*fuel*”, “*emissions*”, “*ahp*”, “*alternatives*” foram mais representativas do grupo de artigos, que no geral tratou de temas sobre análise hierárquica de processos no auxílio à resolução de problemas relacionados à emissão de gases e à escolha de alternativas. No trabalho de Ren e Lützen (2015), os autores desenvolveram uma metodologia para determinar alternativas tecnológicas e sustentáveis para redução na emissão de gases em transportes marítimos considerando incerteza nos dados. No artigo de An *et al.* (2016) avaliaram a sustentabilidade em águas subterrâneas e, para isso, utilizaram a análise multicritério. No artigo Souza *et al.* (2024), os autores desenvolveram um modelo de avaliação multicritério para analisar os combustíveis para aviões sob a ótica da sustentabilidade.

No tópico seis, as palavras de destaque foram “*treatment*”, “*wastewater*”, “*wastewater treatment*”, “*technologies*”, “*reactor*”. Os artigos do tópico trataram de questões sobre tratamento de águas residuais. O estudo de Ren e Liang (2017) desenvolveu um método de análise multi-atributo para selecionar o método de tratamento de águas residuais mais sustentável. No artigo dos autores Attri *et al.* (2022), a análise multicritério foi utilizada

para auxiliar na escolha da tecnologia sustentável para o tratamento de águas residuais. Já no trabalho de Kamali *et al.* (2019), averiguou-se a abordagem *fuzzy-delphi* para avaliação dos parâmetros de classificação de tecnologias sustentáveis no tratamento de poluentes.

O tópico sete, apresentou destaque para as palavras “*urban*”, “*benchmarking*”, “*city*”, “*network*”, “*performance*”. Os artigos desse grupo estudaram problemáticas do meio urbano, como o artigo de Jasti e Ram (2019) avaliaram alternativas sustentáveis para o metrô de Mumbai e utilizaram técnicas de tomada de decisão multicritério. No artigo de Alexandrescu *et al.* (2018), os autores propuseram o conceito de sustentabilidade para regeneração de áreas urbanas por meio de práticas de comunicação entre atores sociais de determinadas localidades. Nesse estudo, os autores utilizaram métodos de análise de rede social e a análise multicritério para ranquear os atores sociais de acordo com critérios de sustentabilidade. No artigo de Lombardi (2009), avaliaram alternativas ao desenvolvimento sustentável urbano na Itália e as multidimensões da sustentabilidade, por meio da abordagem multicritério.

O tópico oito apresentou as palavras “*site*”, “*location*”, “*gis*”, “*suitable*”, “*areas*” em destaque, os artigos do grupo abordaram temas sobre seleção de lugares para fins específicos, como o artigo de Fard *et al.* (2022), que os autores utilizaram a análise multicritério, ferramentas de sistemas de informações geográficas e a teoria de jogos para selecionar lugares mais adequados para aterros sanitários numa província da Itália, considerando a perspectiva da sustentabilidade. No artigo de Mozaffari *et al.* (2023), utilizaram a MCDM e GIS para escolha de lugares para aterros sanitários numa cidade do Irã e, por fim, o artigo de Rahimi *et al.* (2020), no qual aplicaram conceitos de avaliação de sustentabilidade do ciclo de vida (LCSA) e análise multicritério (MCDM) fundamentada em sistema de informação geográfica (GIS) para escolha de um aterro sanitário sustentável numa cidade do Irã.

No tópico nove, as palavras “*chain*”, “*supply*”, “*supply chain*”, “*drivers*”, “*barriers*” ficaram em evidência. Em termos gerais, os artigos desse grupo desenvolveram estudos acerca de cadeias de abastecimento, como o estudo de Erol, Sencer e Sari (2011), no qual os autores avaliaram a sustentabilidade do desempenho de empresas e suas cadeias de abastecimento por meio do uso da análise multicritério baseada em entropia *fuzzy*. No artigo de Sharma *et al.* (2020), os autores identificaram os obstáculos e os aspectos impulsionadores da sustentabilidade nas cadeias de abastecimento; para isso, utilizaram a análise hierárquica de processos associada a técnicas *fuzzy*. No trabalho de Rostanzadeh *et al.* (2018), os autores avaliaram a gestão sustentável de risco da cadeia de suprimentos; para isso, utilizaram a análise multicritério *fuzzy* e métodos de correlação intercritério.

Nos artigos do tópico dez destacaram-se as palavras “*farming*”, “*crop*”, “*agricul-*

*tural*”, “*green*”, “*practices*”. Os artigos desse grupo trataram de problemas relacionados à agricultura, como o artigo de Qureshi, Singh e Hasan (2018), que investigou culturas agrícolas sustentáveis ideais para o contexto indiano e, para isso, utilizou um modelo de tomada de decisão multicritério. Já no trabalho de Singh e Mallick (2019), os autores avaliaram culturas sustentáveis para um sistema de câmara verde e utilizaram análise multicritério baseada em *fuzzy*. No artigo de Reis *et al.* (2023), os autores avaliaram a sustentabilidade de sistemas agrícolas; para isso, propuseram um modelo nebuloso.

Os trabalhos da base de dados sobre análise multicritério *fuzzy* demonstraram a variabilidade do uso da metodologia em diversas áreas para avaliação da sustentabilidade. Além disso, a abordagem *fuzzy* foi amplamente utilizada concomitante com a análise multicritério, denotando a validade dos métodos para diferentes tipos de análise. No contexto da proposta desta tese, destaca-se o tópico dez que apresentou trabalhos sobre sustentabilidade nas práticas agrícolas; ainda assim, não foi observada a menção à sustentabilidade agroambiental. A partir disso, foi realizada uma nova busca para os trabalhos sobre sustentabilidade agroambiental que serão apresentados na seção seguinte.

#### 2.2.2.4 Discussão dos artigos no contexto de sustentabilidade agroambiental

Nesta seção foram apresentados os artigos que abordaram a sustentabilidade agroambiental. O termo de busca utilizado para identificação dos artigos na temática foi: *TITLE-ABS ( ( multi\* W/1 criter\* ) AND ( decision AND mak\* ) ) AND TITLE-ABS ( sustainability ) AND TITLE-ABS ( agr\* W/1 environment\* ) AND ( LIMIT-TO ( SRCTYPE, "j" ) AND ( LIMIT-TO ( DOCTYPE, "ar" ) AND ( LIMIT-TO ( SUBJAREA, "EART" ) OR LIMIT-TO ( SUBJAREA, "ENVI" ) OR LIMIT-TO ( SUBJAREA, "AGRI" ) OR LIMIT-TO ( SUBJAREA, "SOCI" ) ) AND ( EXCLUDE ( EXACTSRCTITLE, "Sustainability Switzerland" ) ) AND ( LIMIT-TO ( LANGUAGE, "English" ) OR LIMIT-TO ( LANGUAGE, "Portuguese" ) OR LIMIT-TO ( LANGUAGE, "Spanish" ) )*. A busca resultou no total de sete artigos científicos na plataforma Scopus.

No estudo de Jorge-García, Estruch-Guitart e Aragonés-Beltrán (2023), os autores iniciam discutindo a importância de serviços ecossistêmicos (SE), que são os benefícios obtidos diretamente dos ecossistemas pelas pessoas. O objetivo do artigo é comparar a priorização dos serviços ecossistêmicos em três áreas úmidas da Espanha, onde a principal atividade econômica é a produção de arroz. Os autores analisam a influência dos tomadores de decisão na priorização desses SEs. Para isso, utilizaram técnicas de análise multicritério que são ferramentas para contribuir para a tomada de decisão quando há muitas alternativas envolvidas no processo decisório. Especificamente, foram utilizadas de forma integrada a Análise Hierárquica de Processos (AHP) e a Análise de Processos de Rede (ANP). Os autores concluíram que há diferenças significativas entre os fatores

geográficos e socioculturais, bem como entre os tomadores de decisão. Eles destacam a necessidade de ampliar a participação dos atores envolvidos na avaliação dos serviços ecossistêmicos. Além disso, os autores sugerem a utilização de métodos multicritérios mais sofisticados, como métodos nebulosos, para uma melhor compreensão dos ecossistemas.

O artigo de Cui *et al.* (2021) apresenta uma comparação entre diversos métodos utilizados para avaliação de sustentabilidade em sistemas agrícolas; para isso, os autores aplicaram os métodos para o caso de sistemas de cultivo na Planície Norte da China. Realizaram a comparação entre métodos (emergia, serviços ecossistêmicos, análise do ciclo da vida e pegada ambiental) com o objetivo de revisar os métodos de avaliação de sustentabilidade e, com isso, concluíram que, para cada sistema de cultivo, os agricultores devem considerar as limitações e a compensação ecológica.

Gürlük e Uzel (2016) investigaram as políticas agroambientais e econômicas ao longo dos anos 1980, 1990, 2000 e 2013 na Alemanha, França, Holanda e Turquia. Para isso, os autores utilizaram análise multicritério fuzzy, em específico, a metodologia TOPSIS, técnica de ordem de preferência por similaridade à solução ideal. Os critérios utilizados no estudo foram: produção per capita de carne, cereais per capita, produção per capita de leite, rendimento de cereais, valor econômico da produção agrícola, eficiência no uso de fertilizantes e pesticidas e emissões totais da agricultura. Os resultados apontaram que os dados dos indicadores econômicos influenciaram significativamente na solução ideal. Além disso, observou-se que a Alemanha e os Países Baixos apresentaram gestão agroambiental mais deficiente em comparação com outros países. Como resultado, os autores sugerem que esses países deveriam ser responsabilizados com um "imposto de poluição" a ser pago aos países com práticas agrícolas mais sustentáveis, como uma forma de incentivar a sustentabilidade na produção agrícola.

No artigo de Hatzioannou e Kokkinos (2021), os autores analisaram os fatores que influenciaram a sustentabilidade em sistemas de pequena agricultura. Para isso, realizaram uma modelagem participativa com as partes interessadas, considerando critérios agrícolas, ambientais e socioeconômicos. Eles utilizaram o método AHP *fuzzy* para um estudo de caso, analisando sistemas agrícolas de pequeno porte de helicultura na Europa e na Grécia. Os resultados indicaram que cada critério apresentou fatores que se destacaram. No conceito geo-tecnológico, fatores como densidade da biomassa, desempenho reprodutivo e alimentação foram os mais importantes. No conceito ambiental, os fatores que mais influenciaram foram a qualidade da água e a umidade. Já nos conceitos sociais e econômicos, a estabilidade do mercado e do local de trabalho, a diversidade social, a segurança da saúde e os aspectos da produção obtiveram maior importância. Os autores destacaram que a avaliação da sustentabilidade requer uma perspectiva holística.

Em Abdi-Dehkordi, Bozorg-Haddad e Chu (2021) investigaram a sustentabilidade hídrica em sistemas de recursos aquáticos de larga escala, incluindo reservatórios e interbacias da bacia do Rio Big Karun no Irã. Para isso, utilizaram uma abordagem de sistemas dinâmicos. Inicialmente, foram aplicados índices individuais de avaliação de sistemas hídricos (Índice de qualidade da água, Índice de estresse hídrico, Índice de receita agrícola, dentre outros). A partir desses índices, os autores construíram um índice composto por meio da Teoria Moderna do Portfólio (MPT) e, por fim, utilizaram o método de análise multicritério TOPSIS. Os resultados do estudo apontaram que, no cenário em que houve uma gestão equilibrada dos recursos hídricos entre as bacias de origem e destino, a sustentabilidade hídrica foi garantida e concluíram que a gestão sustentável dos recursos hídricos é essencial para garantir a sustentabilidade da Bacia do Big Karun.

No trabalho de Carof, Colomb e Aveline (2013), os autores realizaram uma revisão de artigos sobre sustentabilidade e elaboraram um guia para os tomadores de decisão selecionarem métodos adequados de avaliação da sustentabilidade em sistemas agrícolas. Inicialmente, construíram uma revisão de literatura e selecionaram sete métodos de avaliação da sustentabilidade em culturas e sistemas agrícolas. Os métodos foram categorizados quanto ao tipo do sistema, à escala espacial e temporal, ao tipo de visualização e ao público-alvo. A avaliação dos métodos ocorreu por meio da participação de diversos atores (cientistas, orientadores, elaboradores de políticas etc.). Os autores concluíram que o método de abordagem participativa para a construção do guia foi eficaz para orientar os decisores na escolha do método de avaliação da sustentabilidade em sistemas agrícolas. Eles constataram um crescimento de métodos propostos para avaliar a sustentabilidade desde 1990. Além disso, dos sete métodos analisados, os autores observaram que a adequabilidade de cada um variou conforme o problema era estudado.

No artigo de Reig, Aznar e Estruch (2010), foi discutida a relevância da sustentabilidade em sistemas agrícolas e a adoção de análises quantitativas para avaliar a sustentabilidade; a partir disso, propuseram um método de análise multicritério e um processo analítico de rede para ranquear tecnologias de cultivo mais ligadas à sustentabilidade, em três culturas de arroz no Parque Natural de Albufera, em Valência, na Espanha. Os autores analisaram a sustentabilidade considerando aspectos econômicos, sociais e ambientais; os pesos evidenciaram a importância de cada aspecto e o impacto nos ecossistemas próximos. Os resultados denotaram que o sistema ecológico de cultivo foi considerado mais sustentável e apontaram que o *cluster* ambiental apresentou maior importância de acordo com os especialistas. Por fim, os autores concluíram que a metodologia proposta é eficiente para avaliar a sustentabilidade de sistemas agrícolas e a necessidade da avaliação da sustentabilidade de maneira holística. Além disso, os autores indicaram o uso da metodologia proposta para outros trabalhos e apontaram como melhoria a realização

de análises da sustentabilidade direcionadas para a elaboração de políticas públicas.

Os trabalhos sobre sustentabilidade agroambiental abordaram problemas específicos dentro do contexto agrícola, incluindo estudos de revisão de literatura sobre avaliação da sustentabilidade agroambiental, estudos que envolvem os serviços ecossistêmicos no contexto da sustentabilidade da agricultura. Na base de dados, apenas o artigo de Hatzioannou e Kokkinos (2021) realizou a análise multicritério *fuzzy* para avaliação da sustentabilidade agroambiental.

### 2.2.3 Conclusão do capítulo

A revisão bibliométrica denotou a abrangência da aplicação da análise multicritério ao estudo da sustentabilidade agroambiental. Inicialmente, a análise focou em trabalhos que discutiram sustentabilidade em termos gerais. Observou-se uma diversidade significativa de áreas de estudo que abordaram o tema da sustentabilidade utilizando métodos de análise multicritério. No entanto, poucos trabalhos trataram as incertezas na MCDA, sendo que os artigos que o fizeram utilizaram o método fuzzy.

Na segunda parte da análise, a busca focou especificamente em artigos que aplicaram a MCDA *fuzzy* no contexto da sustentabilidade. Constatou-se que MCDA *fuzzy* foi utilizada para estudar a sustentabilidade em diferentes contextos, inclusive para o âmbito da sustentabilidade em práticas agrícolas. No entanto, não foram encontrados trabalhos que mencionassem o termo “sustentabilidade agroambiental”, que é o foco desta tese.

Conseqüentemente, foi realizada uma terceira busca para compreender a produção científica sobre a sustentabilidade agroambiental. Esta busca revelou uma quantidade limitada de estudos na base de dados, com apenas sete artigos. Esses estudos apresentam enfoques variados e apenas um artigo utilizou a análise multicritério *fuzzy* para avaliar a sustentabilidade agroambiental em sistemas de pequena agricultura.

A pesquisa bibliográfica revelou uma escassez de literatura sobre a sustentabilidade agroambiental no Matopiba, área estratégica conforme o Plano de Desenvolvimento Agropecuário (Decreto 11.767/2023). Embora o levantamento tenha identificado temas correlatos aos impactos ambientais (como incêndios, uso de água e emissão de carbono), a sustentabilidade agroambiental não foi o foco. Além disso, a bibliometria sobre o uso da análise multicritério fuzzy em estudos dessa natureza mostrou-se ainda mais limitada: apenas um artigo abordou a temática em sistemas de pequena agricultura com esse método. Essa constatação demonstra uma lacuna significativa na literatura em relação à análise da sustentabilidade agroambiental utilizando a análise multicritério *fuzzy* e evidencia a necessidade de mais pesquisas nessa área, especialmente para fornecer ferramentas robustas que possam auxiliar na tomada de decisões sustentáveis em práticas agrícolas.

### 3 DETERMINAÇÃO DE TERRAS AGRÍCOLAS ABANDONADAS NO MATOPIBA

As fronteiras agrícolas podem ser definidas como regiões com potencial para desenvolvimento de mercado, produção, transporte, mão de obra e disponibilidade de terras sujeitas à expansão das atividades agrícolas (Schiesari *et al.*, 2013). A fronteira agrícola mais recente do Brasil é a chamada Matopiba e ocupa área total de aproximadamente 73,2 milhões de hectares.

O Matopiba foi criado por decreto federal nº 8.447/2015 após uma série de políticas de estímulo à expansão da agricultura e da pecuária em uma região que abrange as regiões do bioma Cerrado<sup>1</sup>. As políticas públicas para a ocupação agrícola do Cerrado tiveram início na década de 1970 e têm desempenhado um papel significativo no fomento à expansão da agricultura e da pecuária no Brasil (Pires, 2000). A implementação destas políticas levou a um aumento notável na produção de cereais e ao crescimento da área cultivada que passou de 1.795.831 hectares em 2005 para 3.292.760 hectares em 2014. Além disso, durante o período entre 2005 e 2010, foram identificados cerca de 950 mil hectares de novas áreas agrícolas (Bolfe *et al.*, 2016).

O processo de uso e ocupação do solo no Matopiba vem causando profundas alterações na paisagem, resultando em impactos ambientais significativos, como a fragmentação e degradação da paisagem (Matricardi *et al.*, 2019). Na verdade, Matopiba é uma das regiões com maiores mudanças no Brasil tanto no uso quanto na cobertura da terra (Gomes *et al.*, 2017). Apesar dos aspectos econômicos positivos proporcionados pela expansão da produção agrícola no Matopiba, vários impactos ambientais negativos resultantes da intensificação das atividades agrícolas têm sido relatados (Vieira *et al.*, 2021). Por exemplo, a supressão da vegetação nativa no Cerrado, impulsionada pela expansão da pecuária e do cultivo de soja, cana-de-açúcar e eucalipto (Vieira *et al.*, 2021). Estima-se que o Cerrado teve sua área de vegetação natural perdida em 88 milhões de hectares (46%), permanecendo com 19,8% de sua área nativa, além do crescimento de 1% ao ano na taxa de desmatamento entre 2002 e 2011 (Strassburg *et al.*, 2017). Esta degradação engloba a perda de bens e serviços ecossistêmicos e o aumento das desigualdades sociais causadas pela concentração de terras.

A Organização para a Alimentação e Agricultura (FAO) das Nações Unidas, que tem como objetivo alcançar a segurança alimentar e a melhoria da nutrição, define terras agrícolas abandonadas como áreas que foram deixadas sem cultivo por um período de dois a cinco anos (FAO, 2016). Em geral, os solos das áreas abandonadas após atividades agrícolas

---

<sup>1</sup> Cerrado é o bioma composto por savana tropical que possui maior diversidade florística do que outros tipos de savanas do mundo (Polizel *et al.*, 2021)

ou de pastagem podem tornar-se pobres em nutrientes devido ao manejo inadequado. Isto destaca a relação entre o tipo de uso da terra e a gestão do solo e seus impactos nos recursos naturais (Lopes *et al.*, 2012). Solos esgotados em nutrientes e outros factores ambientais também podem contribuir para o abandono da terra. O abandono de terras agrícolas também pode estar ligado a disputas de terras, incluindo conflitos armados, bem como à remota localização destas áreas relativamente a estradas e mercados para transporte de produtos agrícolas (Yang e Song, 2023).

Num sentido mais específico, o abandono de terras agrícolas é caracterizado pela interrupção das atividades agrícolas, o que pode resultar na regeneração da vegetação natural em pastagens ou florestas (Yang e Song, 2023). Embora as áreas abandonadas apresentem alguns benefícios, como o sequestro de carbono (Yang e Song, 2023), os ganhos ambientais são complexos e incertos dependendo do momento do abandono e dos benefícios ecológicos (Yang e Song, 2023). Portanto, os efeitos do abandono da terra dependem do contexto do local afetado, mas no que diz respeito às questões socioeconômicas e culturais, os impactos são geralmente negativos (Fayet e Verburg, 2023).

Os impactos negativos do abandono de terras agrícolas estão relacionados com o desaparecimento de práticas agrícolas tradicionais, perda de habitats de alto valor ecológico, alta probabilidade de incêndio e invasão de espécies exóticas, que tem um grande impacto na segurança alimentar, especialmente para a população que vive da agricultura de subsistência em áreas onde prevalecem a pobreza e a escassez de alimentos (Díaz *et al.*, 2011). Outros impactos negativos incluem a migração da população rural para áreas urbanizadas (Hong *et al.*, 2023), e o declínio da diversidade de aves, que tem sido observado em certas cidades europeias na Península Balcânica (Zakkak *et al.*, 2015). Neste sentido, o abandono de terras agrícolas representa uma grave ameaça à segurança alimentar devido à incerteza de restabelecer terras que anteriormente eram destinadas às atividades agrícolas e à produção de alimentos. Então, rastrear o abandono de terras agrícolas contribui para compreender a relação entre as atividades humanas e o meio ambiente (Hong *et al.*, 2023).

Motivados por esta questão, foram propostas diversas abordagens para rastrear o abandono de terras agrícolas, e o tema tem sido estudado em diferentes locais do mundo. Por exemplo, (Yang e Song, 2023) abordou este problema em uma área montanhosa na China usando dados de imagem de satélite e informações sobre uso e cobertura do solo. Eles identificaram áreas abandonadas realizando uma análise espaço-temporal e realizaram projeções de abandono, concluindo que investimentos em políticas públicas que garantam uma gestão adequada nas zonas montanhosas seriam uma solução para o problema do abandono das terras agrícolas. (Li *et al.*, 2023) analisou o abandono de terras agrícolas sob a perspectiva da restauração ecológica usando imagens de satélite para identificar padrões espaciais de abandono em Chongqing, China. Yin *et al.* (2020) desenvolveram uma

abordagem para analisar o abandono de áreas cultivadas em diferentes biomas ao redor do mundo usando imagens de satélite. Díaz *et al.* (2011) identificaram fatores no abandono de terras agrícolas no sul do Chile através de um modelo de análise espacial estatística, e concluiu que a qualidade do solo e a distância dos centros de produção foram significativas no abandono desta região. Kosmas *et al.* (2015) avaliaram a relação entre o abandono da terra com 48 variáveis selecionadas no Mediterrâneo, Europa Oriental, América Latina, África e Ásia, concluindo que as variáveis estatisticamente mais significativas para o abandono foram a sazonalidade das chuvas, o índice de idosos, a fragmentação, o tamanho da propriedade, o solo e o nível de implementação da política. No entanto, rastrear o abandono de terras agrícolas nas fronteiras agrícolas ainda é um tema em aberto, o que constitui uma das motivações deste trabalho.

Embora o abandono de terras agrícolas seja um tema de investigação globalmente significativo, a exploração deste tema no Brasil tem sido relativamente limitada. Há estudos relacionados ao abandono de terras agrícolas no Brasil, como por exemplo, (Castro *et al.*, 2020) e (Castro *et al.*, 2022). Os autores (Castro *et al.*, 2020) examinaram especificamente o problema do abandono de terras agrícolas impulsionado pela crise do setor sucroenergético numa região do estado do Rio de Janeiro. Já no artigo de (Castro *et al.*, 2022), os autores realizaram um mapeamento abrangente do abandono em áreas de cultivo de cana-de-açúcar no Região Norte Fluminense do Rio de Janeiro. Apesar da importância econômica e ambiental da região do Matopiba no Brasil, estudos sobre abandono de terras agrícolas são incipientes para esta importante fronteira agrícola brasileira, o que também motiva este trabalho. Além disso, as projeções indicam que o Brasil atenderá cerca de 40% da população mundial demanda alimentar em 2050 (Gomes *et al.*, 2017), o que também destaca a importância do monitoramento do abandono de terras agrícolas no Matopiba.

A importância de investigar o abandono de terras agrícolas no Matopiba está principalmente relacionada ao fato de que o Matopiba foi implementado com a justificativa de desenvolver e expandir as atividades agrícolas por meio do agronegócio sustentável no Cerrado, uma região importante no atual cenário de produção agrícola e segurança alimentar no Brasil (Polizel *et al.*, 2021). O abandono das terras agrícolas nesta região pode indicar que os produtores foram marginalizados e estavam sem o devido incentivo para produzir alimentos, o que ameaça a permanência dessa população no meio rural e pode resultar em outros problemas sociais, inclusive no meio urbano. Além disso, como parte da produção agrícola do Matopiba provém da agricultura familiar baseada em práticas agrícolas tradicionais, o abandono de terras agrícolas pode impactar o modo de vida dessas famílias, impactando-as também culturalmente e ameaçando a segurança alimentar da população que depende desta produção. Em particular, esta região registou conflitos armados por disputas de propriedade de terras e grilagem de terras que podem levar ao

abandono de terras, principalmente entre os pequenos agricultores (Jesus e Almeida, 2022). Mais grave ainda, as áreas abandonadas sem supervisão têm biomassa disponível para dispersão de incêndios, o que também pode aumentar a incidência de incêndios (Díaz *et al.*, 2011).

A partir da discussão acima, fica clara a importância de abordar os estudos de abandono de terras agrícolas no Matopiba desenvolver políticas públicas adequadas para a distribuição e recultivo de terras. As políticas públicas para prevenir o abandono podem estar relacionadas com sistemas de assistência técnica, acesso a financiamento e amplo acesso ao mercado para vender a produção (Yang e Song, 2023). Essas políticas devem ser elaboradas considerando informações espaço-temporais dos impactos do abandono e dos atores envolvidos neste processo, por se tratar de um fenômeno complexo (Lasanta *et al.*, 2017).

Este estudo aborda o rastreamento do abandono de terras agrícolas numa recente fronteira agrícola brasileira, o Matopiba. Para isso, adotamos uma metodologia para identificar terras agrícolas abandonadas, rastreando a trajetória de mudança no uso da terra (Yang e Song, 2023). Coletamos dados de uso e cobertura da terra de 2006 a 2021 do banco de dados MapBiomas usando a plataforma Google Earth Engine (GEE) (Jr *et al.*, 2020). Em seguida, os dados coletados foram submetidos a uma recursão de série temporal pixel a pixel para obter o abandono de terras agrícolas. Os indicadores de abandono de terras agrícolas também foram submetidos à análise espacial para determinar padrões espaciais de terras agrícolas abandonadas. Além disso, também estabelecemos a relação entre as áreas agrícolas abandonadas identificadas e os factores de declividade, tipos de solos e adequabilidade dos solos à agricultura. Os resultados aqui obtidos podem contribuir para a compreensão do fenômeno do abandono de terras agrícolas ao longo dos anos no Matopiba e indicar as áreas que demandam maior apoio de possíveis políticas públicas para mitigar os impactos relacionados ao abandono de terras agrícolas.

Este capítulo está estruturado da seguinte forma. Os materiais e métodos são descritos na Seção 3.1, onde discutimos em detalhes os procedimentos de coleta de dados sobre uso da terra, construção de indicadores para avaliação do abandono de terras agrícolas e os métodos de análise estatística espacial. Os resultados são apresentados e discutidos na Seção 3.2. Finalmente, as observações finais são apresentadas na Seção 3.3.

### 3.1 Metodologia para rastrear o abandono de terras agrícolas no Matopiba

Técnicas de geoprocessamento e estatística espacial foram empregadas para identificar e analisar o abandono de terras agrícolas em Matopiba. Inicialmente, as áreas abandonadas foram detectadas por meio de cálculos algébricos aplicados a camadas raster de uso e cobertura da terra ao longo de 16 anos (2006-2021). Após essa identificação, uma análise espacial foi conduzida para examinar os padrões de abandono, incluindo a geração de um mapa de densidade de Kernel, a determinação da elipse do desvio padrão e o cálculo da autocorrelação espacial. Posteriormente, a caracterização ambiental das áreas abandonadas foi realizada pela intersecção dessas áreas com variáveis como declividade, tipos de solos e aptidão agrícola. Finalmente, uma análise estatística foi realizada para avaliar a relação entre essas variáveis ambientais e o abandono de terras agrícolas, visando identificar potenciais relações de causa e efeito.

#### 3.1.1 Coleta de dados de uso e cobertura da terra

Neste estudo, os dados de uso e cobertura da terra do inglês *Land Use Land Cover* (LULC) foram coletados para a geometria do Matopiba para os anos de 2006 a 2021. Os dados foram coletados usando *Toolkit* fornecido pelo MapBiomas (Jr *et al.*, 2020) dentro da plataforma Google Earth Engine.

Os dados LULC fornecidos pelo MapBiomas foram desenvolvidos por vários pesquisadores que trabalharam em colaboração para produzir uma série temporal de 1985 a 2021. Os dados são de acesso aberto e fornecem informações sobre uso e cobertura do solo no Brasil com resolução de 30 metros. Os autores utilizaram imagens de satélite associadas a amostras de treinamento coletadas de diferentes biomas e temas, com o objetivo de melhorar a qualidade do conjunto de dados de treinamento com base nas informações disponíveis e nos requisitos estatísticos (Jr *et al.*, 2020). Resultando assim, mapas de classificação do uso e cobertura do solo.

Para garantir a confiabilidade dos mapas, o MapBiomas emprega uma metodologia robusta para classificação de imagens de satélite. Essa metodologia inclui o uso de tecnologias avançadas, como aprendizado de máquina com o algoritmo Random Forest, que considera diversas variáveis de entrada, como bandas NDVI e Landsat. A classificação é realizada utilizando amostras de treinamento coletadas em diferentes biomas e temas. Essas amostras são selecionadas com base nas informações disponíveis e nos requisitos estatísticos para melhorar a qualidade do conjunto de dados de treinamento (Jr *et al.*, 2020; MapBiomas, 2021). Após a classificação inicial, um processo de pós-classificação é conduzido, incluindo etapas de reclassificação e integração de mapas para garantir maior

consistência e precisão. Os mapas são validados com amostras independentes e avaliados usando métricas específicas (MapBiomias, 2021).

A precisão dos mapas resultantes é expressa em diferentes níveis hierárquicos de classificação. Na Coleção 7.1, a precisão geral para as classes do Nível 1 é de aproximadamente 87%, com divergências de alocação de 7,5% e divergências de área de 1,7%. No Nível 2, a precisão permanece em torno de 87%, com 9,3% de divergência de alocação e 3,3% de divergência de área. No Nível 3, os valores são semelhantes, com 87% de precisão geral, 9,2% de divergência de alocação e 3,4% de divergência de área (MapBiomias, 2021).

Os dados geoespaciais fornecidos pelo MapBiomias, combinados com as metodologias descritas, permitem uma análise detalhada e a identificação de terras agrícolas abandonadas no Matopiba. Para tanto, utilizamos dados de uso e cobertura da terra da Coleção 7 do MapBiomias, correspondentes a imagens de satélite Landsat classificadas de acordo com um esquema de classificação hierárquica. No mapa de uso e cobertura da terra, as classes de Nível 1 incluem floresta, formação natural não florestal, agricultura, áreas não vegetadas, água e não observadas. Cada uma dessas categorias é subdividida. Por exemplo, florestas incluem vegetação florestal, savanas e manguezais, entre outras formações (MapBiomias, 2021). Para analisar o uso e a ocupação da terra em Matopiba entre 2006 e 2021, os dados foram reclassificados em seis categorias principais: Floresta, Formação Natural Não Florestal <sup>2</sup>, Pastagem, Agricultura, Área Não Vegetada e Água. Esse processo de reclassificação visa simplificar a análise, agregando subclasses nas grandes classes propostas pelo Mapbiomas (para maiores detalhes ver (MapBiomias, 2021)). O objetivo é facilitar a identificação de terras agrícolas abandonadas. Essas informações reclassificadas servem como base para a identificação e quantificação de terras abandonadas em Matopiba.

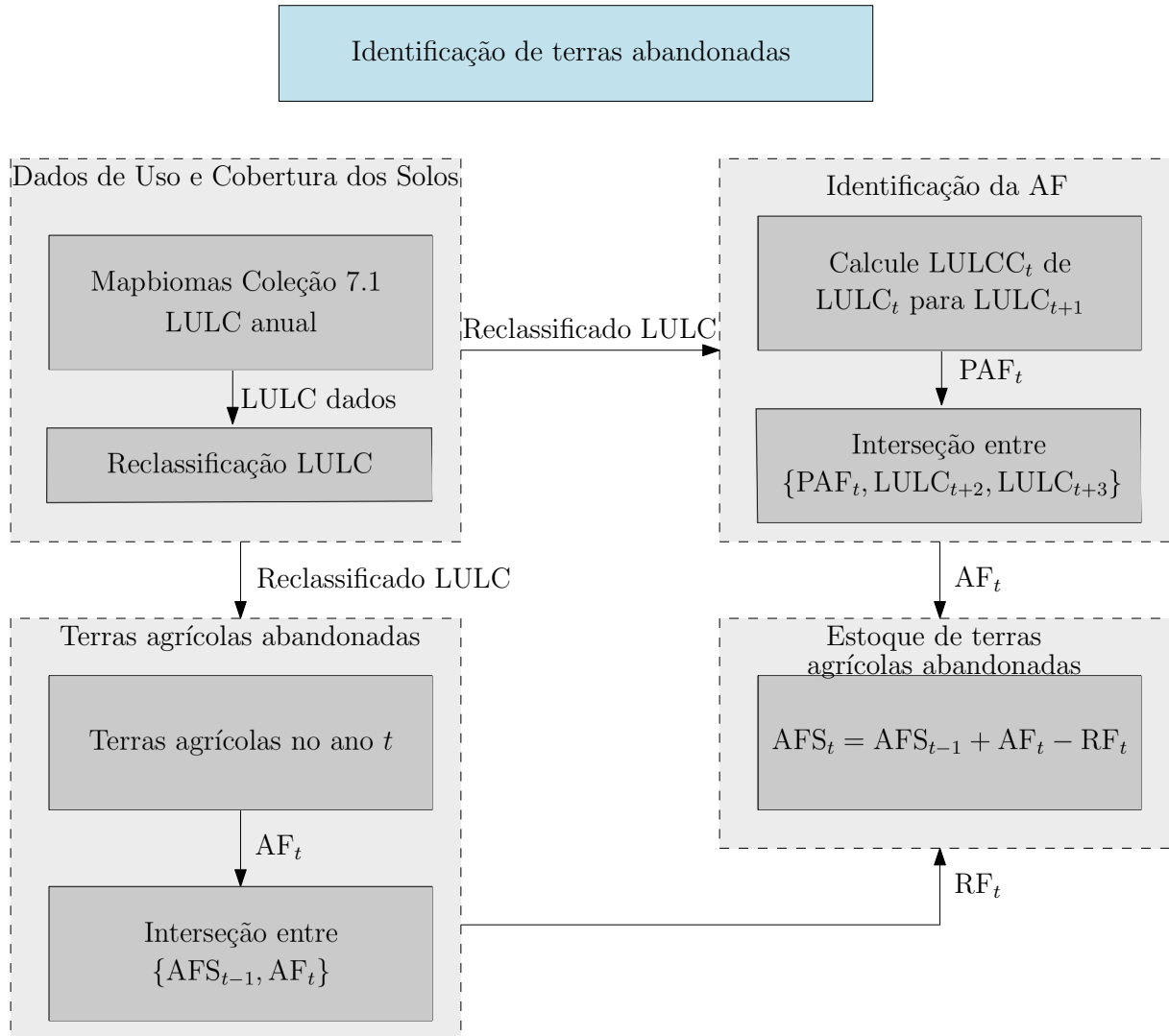
### 3.1.2 Indicadores para identificação espaço-temporal do abandono de terras agrícolas

Os principais procedimentos utilizados neste estudo para avaliar o abandono de terras agrícolas estão descritos na Figura 3.1. A etapa inicial envolve a coleta de dados de uso de cobertura dos solos, LULC, da sigla em inglês *Land Use Land Cover* de 2006 a 2021 do banco de dados Mapbiomas Collection 7.1, normalmente fornecidos em 38 classes distintas. Na segunda etapa, os dados de uso e ocupação do solo foram reclassificados e consolidados em seis classes: Floresta, Formação Natural Não Florestal, Pastagem, Agricultura, Área Não Vegetada e Água.

Em seguida, para identificar as áreas agrícolas abandonadas, aplicou-se o critério

<sup>2</sup> A Formação Natural Não Florestal é a categoria do MapBiomias que agrupa toda a vegetação nativa herbácea e arbustiva do Brasil, excluindo as florestas e as formações savânicas densas. Ela engloba subcategorias como Formação Campestre, Campo Alagado, Área Pantanosa, Afloramento Rochoso, Apicum e Restinga Herbácea, sendo fundamental para diferenciar as áreas naturais de pastagens e outras atividades antropizadas (MapBiomias, 2021).

**Figura 3.1** – A metodologia proposta para identificação espaço-temporal do abandono de terras agrícolas no Matopiba, Brasil.



**Fonte:** Elaboração própria com base nos dados da pesquisa.

de abandono de três anos. Embora não esteja disponível na literatura uma definição precisa do período que caracteriza o abandono agrícola, segundo a FAO, o abandono de terras agrícolas pode ser definido como quando as terras agrícolas ou de pastagem deixam de ser cultivadas dentro de 2 a 5 anos. No entanto, como as terras agrícolas podem ser confundidas com áreas de pousio (Yin *et al.*, 2020), este estudo também considera as áreas que foram recultivadas como um critério adicional.

Portanto, as áreas abandonadas foram determinadas avaliando as alterações no LULC de um ano para o ano seguinte, juntamente com a persistência sustentada desta mudança ao longo dos três anos subsequentes. A seleção do prazo de três anos está alinhada com os princípios delineados com o processo de sucessão natural da vegetação, que estipula a duração da transição de áreas abandonadas para pastagens ou ecossistemas

florestais (Yang e Song, 2023).

Isso significa que uma área é considerada abandonada se era área de Pastagem ou Agricultura no ano  $t$  e, no ano  $t + 1$ , passa a ser Floresta ou Formação Natural Não Florestal, permanecendo em uma dessas classes nos anos  $t + 2$  e  $t + 3$ . Assim, após a etapa de reclassificação, fornecidos os dados de LULC nos anos  $t$  e  $t + 1$  ( $LULC_t$  e  $LULC_{t+1}$ , respectivamente), a Variação de LULC no ano  $t$  ( $LULCC_t$ ) foi calculada. Em seguida, foram extraídas as Áreas Agrícolas Potencialmente Abandonadas, da sigla em inglês *Potential Abandonment Farmlands*,  $PAF$ , no ano  $t$  ( $PAF_t$ ), ou seja, as  $PAF_t$  corresponderam às áreas que eram Pastagem ou Agricultura no ano  $t$  e foram alteradas para Floresta ou Formação Natural Não Florestal no ano  $t + 1$ . Para obter  $PAF_t$  foi utilizada a ferramenta de pós-processamento Semi Classification Plugin (SCP) desenvolvida por Congedo (2016). Para determinar as terras agrícolas abandonadas, da sigla  $AF$  (*Abandonment Farmland*), no ano  $t$  ( $AF_t$ ), calculamos a interseção entre  $PAF_t$ ,  $LULC_{t+2}$  e  $LULC_{t+3}$ , garantindo que as áreas permanecessem como Formação Natural Florestal ou Não Florestal durante três anos consecutivos, sendo assim consideradas abandonadas pelo critério de três anos.

Além do indicador de terras agrícolas abandonadas  $AF_t$ , seguindo passos semelhantes ao Yang e Song (2023), dois outros indicadores foram considerados para avaliar o abandono de terras agrícolas: as terras agrícolas recultivadas, da sigla  $RF$  (*Recultivated Farmland*), no ano  $t$  ( $RF_t$ ), e o estoque de terras agrícolas abandonadas, da sigla  $AFS$  (*Abandonment Farmland Stock*), no ano  $t$  ( $AFS_t$ ). A terra agrícola recultivada no ano  $t$  ( $RF_t$ ) é definida como a quantidade de terras agrícolas abandonadas no ano anterior ( $AFS_{t-1}$ ) que foram recultivadas no ano atual  $t$ . Observe que a área de terras agrícolas no ano  $t$  ( $FA_t$ ), é composta pelas áreas de atividades de Pastagem e Agricultura disponíveis nos dados  $LULC_t$ .

O  $AFS_t$  é o estoque de áreas abandonadas no ano  $t$  e é dado pela quantidade de terras agrícolas abandonadas no ano anterior ( $AFS_t$ ) adicionadas às terras agrícolas recém-abandonadas no ano  $t$  ( $AF_t$ ) e subtraído pela área agrícola recultivada no mesmo ano ( $RF_t$ ), ou seja,

$$AFS_t = AFS_{t-1} + AF_t - RF_t. \quad (3.1)$$

Semelhante a (Yin *et al.*, 2020), também calculamos a taxa de abandono (AR) do  $AFS_t$  da seguinte forma:

$$AR_t = \frac{AFS_t}{FA_t} \times 100\%, \quad (3.2)$$

onde  $FA_t$  é a área total dedicada às atividades de Pastagem e Agricultura no ano  $t$  disponível nos dados de LULC. Conforme mostrado na Fig 3.1, os indicadores de abandono

considerados estão relacionados entre si, criando uma cadeia de realimentação. Observe também que todos os procedimentos descritos na Fig. 3.1 são executados pixel por pixel.

### 3.1.3 Ferramentas para análise espacial de indicadores de abandono de terras agrícolas

Este estudo utilizou duas ferramentas espaciais, a elipse de desvio padrão, da sigla *Standard Devitational Ellipse* (SDE) e a estimativa de densidade de *kernel*, da sigla *Kernel Density Estimation* (KDE), para analisar os padrões espaciais e temporais de abandono de terras agrícolas no Matopiba. Esses métodos permitiram a identificação de tendências na distribuição geográfica, concentração e dispersão de terras agrícolas abandonadas.

A SDE, uma ferramenta estatística introduzida por (Yuill, 1971), resume as características espaciais de um conjunto de pontos geográficos. Ela fornece *insights* sobre a localização, dispersão e orientação médias de um fenômeno. Uma elipse menor indica maior concentração, enquanto uma elipse maior reflete maior dispersão. A direção do eixo principal da elipse identifica a tendência predominante na distribuição espacial. Este estudo aplicou a SDE para avaliar o comportamento espacial dos indicadores de Terras Agrícolas Abandonadas (AF) ao longo do tempo. Este método forneceu uma representação visual e quantitativa de como os padrões de abandono evoluíram em Matopiba, capturando mudanças na concentração e distribuição desses fenômenos.

Para complementar a SDE, o KDE foi empregado para identificar pontos críticos de abandono de terras agrícolas. O KDE calcula a densidade de pontos geográficos dentro de um raio definido, gerando um mapa de calor onde cores mais próximas do vermelho indicam concentrações mais altas. Este método é particularmente eficaz para detectar regiões com maiores taxas de abandono e fornece informações valiosas sobre a concentração espacial de terras agrícolas abandonadas (Chen, 2017). A análise do KDE foi baseada em uma camada de pontos geográficos derivada do número total de observações de terras agrícolas abandonadas a partir de dados raster de terras agrícolas abandonadas de 2018 a 2021. A função quártica, conhecida por sua superfície de densidade suave e contínua, foi empregada para garantir precisão e clareza (Prudencio-Vázquez *et al.*, 2023). Como resultado, gerou-se um mapa de densidade detalhado destacando as áreas que requerem intervenções prioritizadas.

### 3.1.4 Estabelecendo a relação entre o indicador de abandono de terras agrícolas com declividade, tipos de solo e aptidão agrícola

A declividade, os tipos de solo e os fatores de aptidão agrícola foram analisados com o objetivo de caracterizar as áreas agrícolas abandonadas e fornecer subsídios para o desenvolvimento de políticas públicas mais eficazes para enfrentar esse fenômeno no Mato-

piba. Para isso, os mapas de declividade, tipo de solo e aptidão agrícola foram sobrepostos utilizando ferramentas de SIG, permitindo a identificação das áreas de interseção com as terras agrícolas abandonadas. As características espaciais dessas áreas foram resumidas por meio de estatísticas descritivas.

Além disso, foi calculado o coeficiente de contingência de *Pearson* para avaliar a força da associação entre essas variáveis ambientais e o abandono de terras agrícolas. Com base no teste do qui-quadrado, esse coeficiente mede o grau de associação entre duas variáveis categóricas. Valores próximos de 0 indicam uma associação fraca ou inexistente, enquanto valores próximos de 1 sugerem uma relação mais forte entre as variáveis analisadas (Stuart, 1953).

O abandono de terras agrícolas é tipicamente estudado em áreas montanhosas da China (Li *et al.*, 2023; Yang e Song, 2023; Hong *et al.*, 2023). No entanto, considerando o relevo diversificado do Matopiba devido à sua grande extensão territorial, este estudo avaliou a relação entre o abandono de terras agrícolas e a declividade na região. Para essa análise, os dados de declividade foram obtidos por meio da plataforma Google Earth Engine (GEE), utilizando a coleção do Modelo Digital de elevação da superfície terrestre Copernicus, que oferece resolução de 30 metros (Gorelick *et al.*, 2017). As declividades foram calculadas em graus, possibilitando a análise dos gradientes e sua relação com as áreas identificadas como terras agrícolas abandonadas.

Adicionalmente, foram analisados os tipos de solo presentes nas áreas abandonadas. Os dados de tipo de solo foram obtidos a partir da plataforma GeoWeb Matopiba (EMBRAPA, 2015), que contempla vinte diferentes classes de solo na região. Esses dados foram processados e cruzados com os dados de abandono agrícola, permitindo a identificação dos tipos de solo predominantes nas áreas abandonadas.

Por fim, foi avaliada a relação entre o abandono e a aptidão agrícola das áreas. A aptidão agrícola é um indicador composto utilizado para identificar as capacidades e limitações dos solos para atividades agrícolas. Os dados foram obtidos a partir de classificações desenvolvidas por Lumbreras *et al.* (2015b), pesquisadores da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) que desenvolveram a avaliação da aptidão dos solos agrícolas do Matopiba com base na disponibilidade de nutrientes, capacidade de retenção e drenagem de água, disponibilidade de oxigênio para as plantas, mecanização e suscetibilidade à erosão. Para essa análise, os mapas de aptidão foram interseccionados com os dados de abandono agrícola e a área, em hectares, foi extraída dessa interseção.

### 3.2 Resultados e discussão

Esta seção apresenta os resultados obtidos com a aplicação do método descrito na Seção 3.1. Primeiramente, apresentamos a identificação do abandono de terras agrícolas no Matopiba. Em seguida, são apresentados os resultados relacionados à análise espacial para determinar as regiões com maiores concentrações de áreas agrícolas abandonadas ao longo dos anos avaliados.

#### 3.2.1 Avaliação de indicadores de abandono de terras agrícolas no Matopiba

Seguindo a metodologia descrita na Seção 3.1.2, as áreas de terras agrícolas abandonadas (AF) no Matopiba foram determinadas para os anos 2006-2018 de acordo com o critério de três anos. Os valores das áreas em abandono (AF) em hectares para cada período avaliado estão apresentados na Tabela 3.1. Em média, a área do AF no intervalo temporal analisado foi de 306.539 hectares. Notavelmente, um ligeiro aumento na AF é observado ao longo do tempo. Especificamente, o ano com mais abandono foi 2016, com 395.088 hectares, o que representa 9,91% de todas as áreas abandonadas. No geral, observa-se que as terras agrícolas foram abandonadas desde o início da análise, em 2006, e foram mantidas ao longo dos anos, com um aumento sutil apenas em 2016 e 2017, dois anos após a institucionalização do Matopiba.

**Tabela 3.1** – Valores das áreas de terras agrícolas Abandonadas (AF) identificadas em hectares do ano de 2006 a 2018 no Matopiba.

Ano	AF (hectares)	(%)
2006	259.358	6,51
2007	280.548	7,04
2008	297.735	7,47
2009	286.726	7,20
2010	277.952	6,97
2011	287.907	7,22
2012	287.685	7,22
2013	268.743	6,74
2014	325.829	8,18
2015	301.532	7,57
2016	395.088	9,91
2017	393.098	9,86
2018	322.805	8,10
Total	3.985.006	100

**Fonte:** Dados da pesquisa

Os resultados da Tabela 3.1 revelaram um total de 3.985.006 hectares de terras agrícolas abandonadas no Matopiba. Estas áreas abandonadas têm uma importância

significativa na produtividade agrícola da região, pois permanecem sem utilização e têm potencial para contribuir para a produção de alimentos. Mesmo que as terras agrícolas abandonadas possam contribuir para a preservação ambiental, para a estabilidade do solo e para o sequestro de carbono, estas contribuições são incertas.

Após a obtenção da AF, foram calculadas as áreas agrícolas recultivadas (RF) para complementar a análise. Os valores calculados dessas áreas para cada ano são mostrados na Tabela 3.2. Para o período analisado, a média da área recultivada foi de 96.840 hectares. Notavelmente, não foram observadas RF nos anos iniciais de análise (2007-2009), com recultivo começando apenas em 2010 e aumentando continuamente até 2018. A maior área agrícola recultivada foi registrada em 2015, totalizando 111.082 hectares (14,77%).

Além disso, também foi computado o estoque de terras agrícolas abandonadas (AFS), que representa o abandono acumulado ao longo do tempo e é representado na Tabela 3.2. Este indicador aumentou e atingiu o valor máximo em 2018, representando 3.233.053 hectares (14%) do total de áreas abandonadas. A taxa de abandono (AR), calculada de acordo com (3.2), também é apresentada na Tabela 3.2. É possível perceber que o AR aumenta ano após ano, indicando o aumento do estoque de terras agrícolas abandonadas referente à área disponível para pastagens e outras atividades agrícolas. Nota-se que o ano de 2006 não está incluído nestes dados porque a informação sobre estoques de terras agrícolas abandonadas (AFS) não está disponível antes desse ano.

**Tabela 3.2** – Análise estatística da terras Recultivadas e estoque de abandono no Matopiba.

Ano	RF (ha)	(%)	AFS (ha)	(%)	AR (%)
2007	0	0,00	539.907	2,34	0,96
2008	0	0,00	837.642	3,63	1,50
2009	0	0,00	1.124.368	4,87	2,02
2010	15.974	2,12	1.386.346	6,00	2,50
2011	35.789	4,76	1.638.465	7,09	2,97
2012	70.974	9,44	1.855.175	8,03	3,40
2013	96.840	12,88	2.027.078	8,78	3,76
2014	96.235	12,80	2.256.672	9,77	4,22
2015	111.082	14,77	2.447.122	10,60	4,62
2016	110.288	14,67	2.731.921	11,83	5,18
2017	107.643	14,32	3.017.376	13,06	5,74
2018	107.128	14,25	3.233.053	14,00	6,16

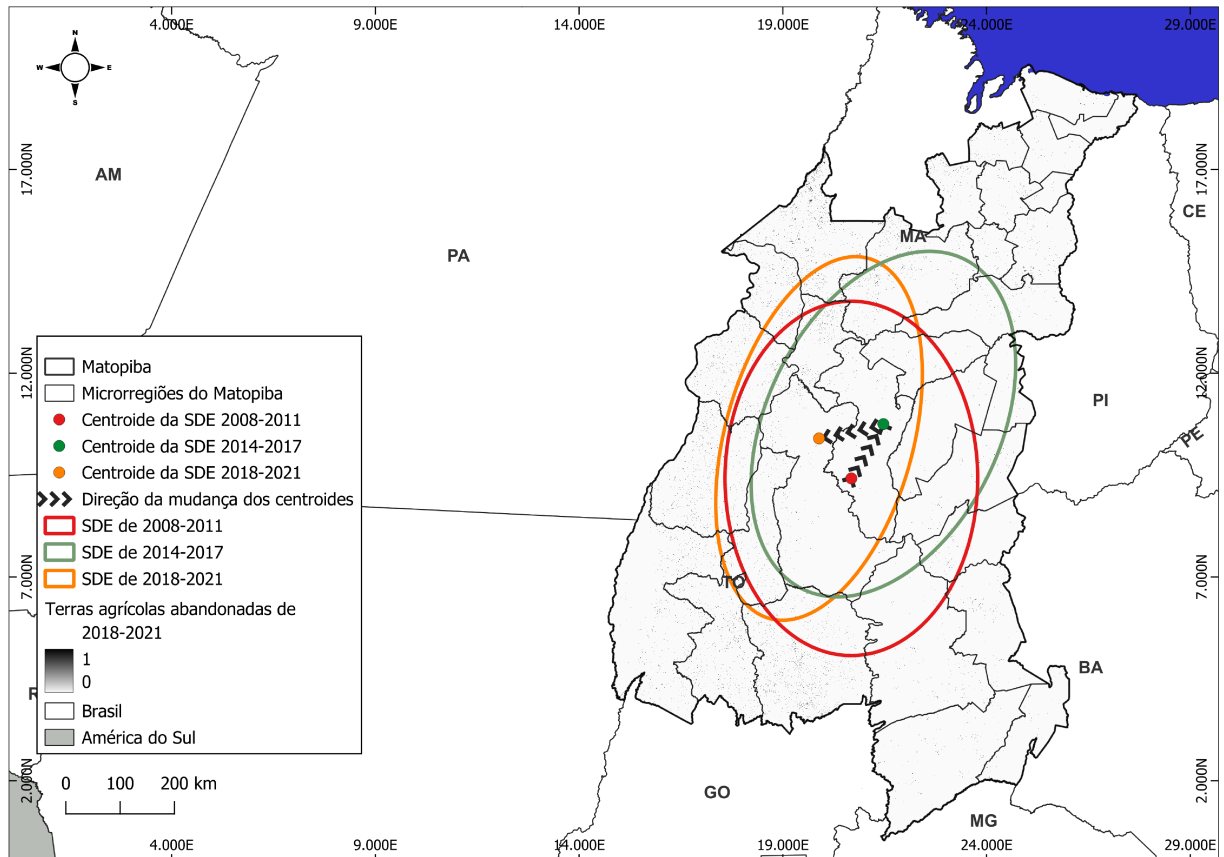
**Fonte:** Dados da pesquisa.

### 3.2.2 Análise espacial dos indicadores de abandono de terras agrícolas

Para avaliar o comportamento espacial dos indicadores de abandono de terras agrícolas entre 2007 e 2018, tanto o AF quanto o AFS foram amostrados para obtenção da

Elipse do Desvio Padrão (SDE) desses indicadores. O SDE do indicador AF é mostrado na Fig. 3.2. A análise utilizando o SDE revela a heterogeneidade na distribuição espacial das áreas de AF ao longo do tempo. Nos primeiros anos, o abandono de terras agrícolas foi mais intenso nas porções oeste e sul. De 2008 a 2012, o abandono foi mais intenso no sentido centro/sul.

**Figura 3.2** – Elipse de desvio padrão (SDE) de áreas agrícolas abandonadas (AF) no Matopiba, Brasil.

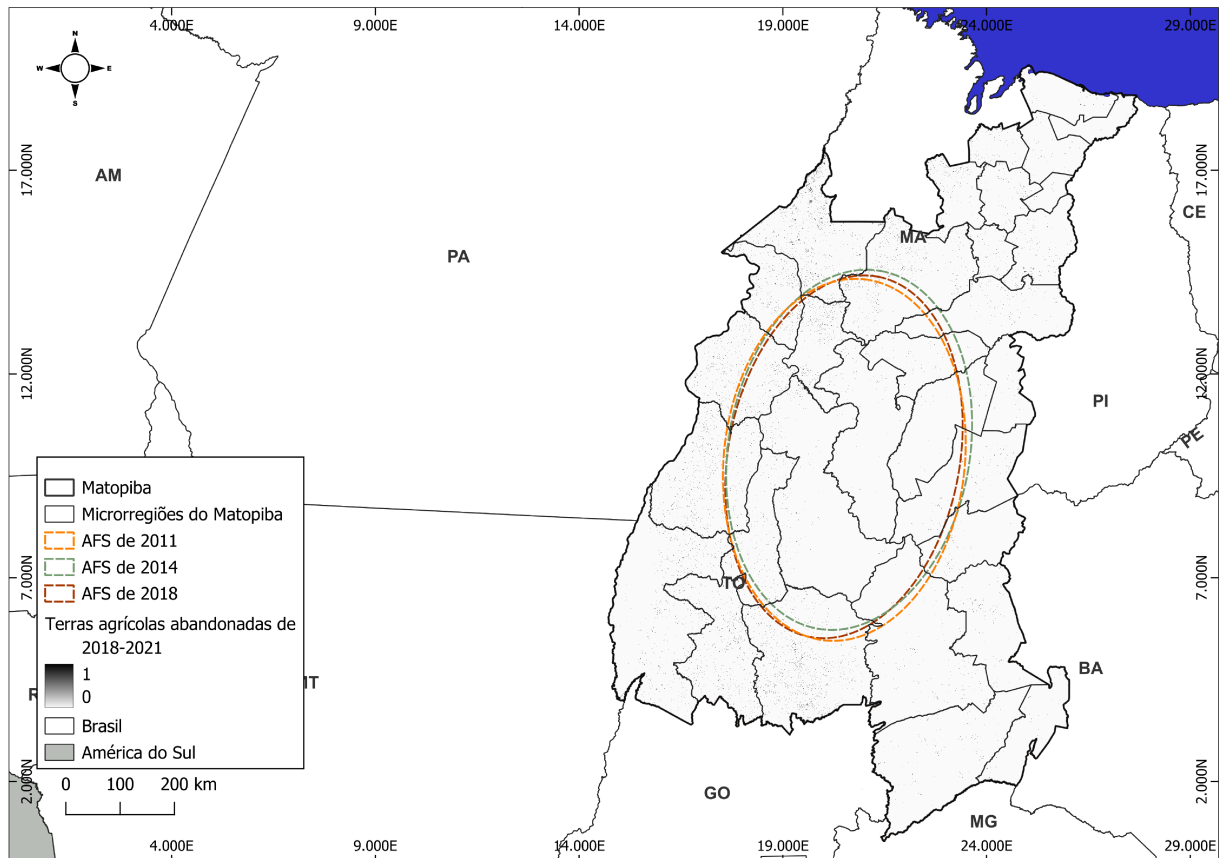


**Fonte:** Dados da pesquisa.

Nos anos 2014-2017, as áreas abandonadas situavam-se mais a norte. Outro período fora do padrão é 2018-2021, que indicou muito mais abandono na direção oeste. Isso indica que praticamente todas as regiões do Matopiba apresentaram abandono de terras agrícolas no período analisado.

É possível notar que a variação do AFS foi pequena ao longo dos anos. Em particular, os resultados indicam uma dispersão relativamente alta de AFSs com tendência para oeste e noroeste do Matopiba. Os SDE do AFS para os anos de 2011, 2014 e 2018 são apresentados na Fig. 3.3.

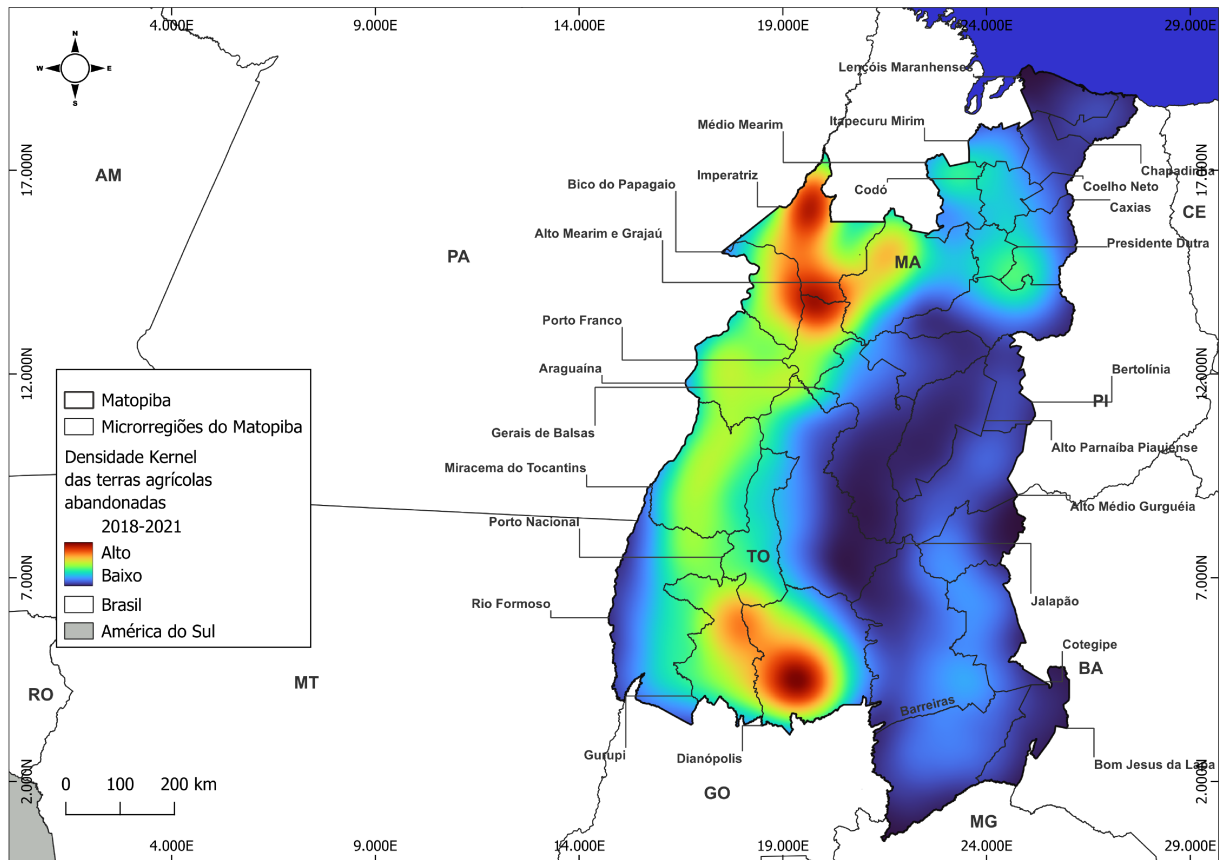
**Figura 3.3** – Elipse de desvio padrão (SDE) do estoque de terras agrícolas abandonadas (AFS) no Matopiba, Brasil.



**Fonte:** Dados da pesquisa.

Além disso, o KDE foi calculado para avaliar a concentração do abandono de terras agrícolas durante os anos de 2018 a 2021, o que é indicado através do indicador  $AF_{2018-2021}$  de acordo com o critério de três anos discutido anteriormente. A análise do KDE revelou uma maior concentração de abandono de terras agrícolas ao longo dos limites ocidentais do Matopiba. Particularmente as maiores concentrações foram observadas nas microrregiões de Dianópolis, Gurupi, Rio Formoso, Porto Nacional, Miracema do Tocantins, Araguaia, Bico do Papagaio, Alto Mearim e Grajaú, e Imperatriz. Este resultado dá uma ideia clara das regiões do Matopiba que demandam mais atenção dos decisores políticos para desenvolverem políticas públicas adequadas para reduzir as áreas agrícolas abandonadas.

**Figura 3.4** – Estimativa da densidade de kernel do abandono de terras agrícolas no Matopiba-Brasil.

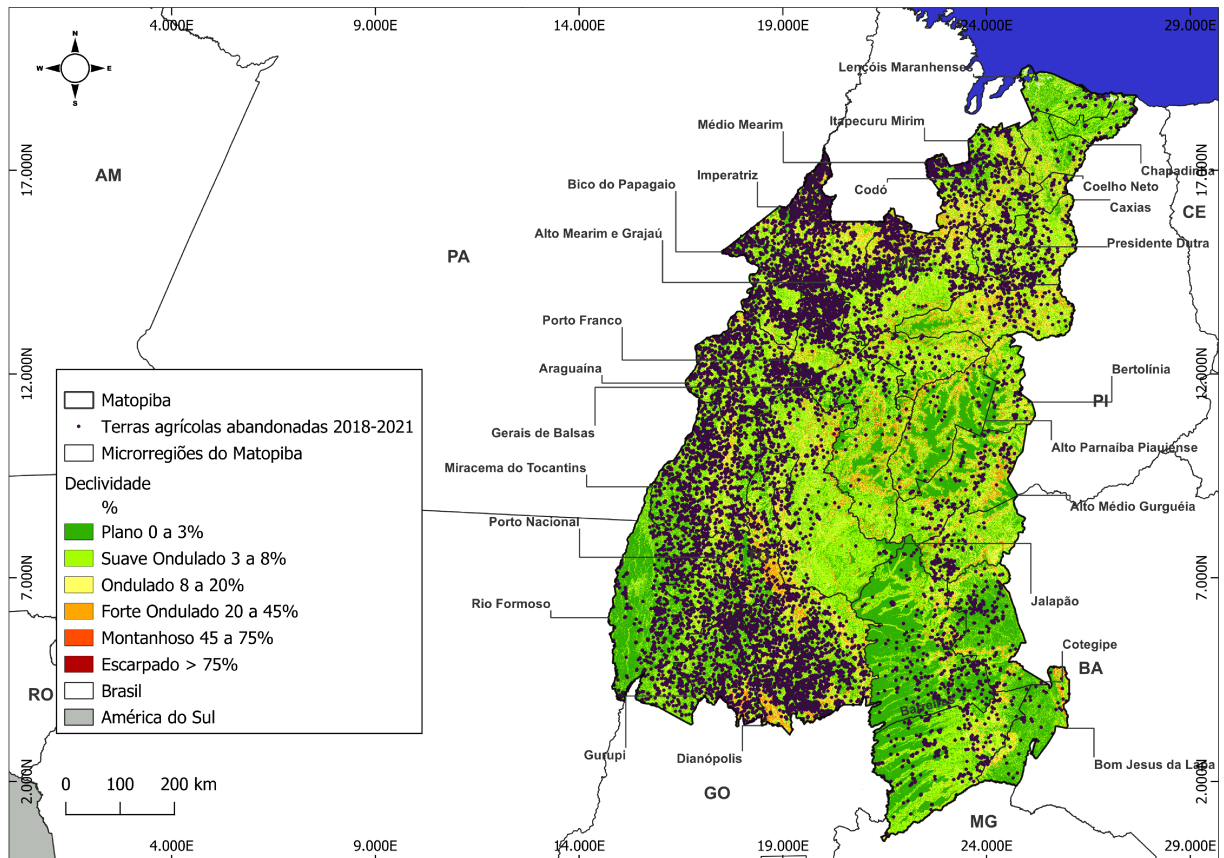


**Fonte:** Dados da pesquisa.

### 3.2.3 Relação entre indicadores de abandono de terras agrícolas com declividade e tipos de solo

Para investigar a relação entre o abandono de terras agrícolas e fatores ambientais, consideramos os dados de declividade do Matopiba classificados conforme a categorização da Embrapa (EMBRAPA, 1979). Em seguida, realizamos a análise de interseção entre o  $AF_{2018-2021}$  e os dados de inclinação do relevo. Os resultados são mostrados na Fig. 3.5. Os resultados mostraram que a área total de terras abandonadas no Matopiba se enquadrava predominantemente em relevo plano (43,26%). Outras classes de relevo incluíram relevo suave ondulado em 29,32%, relevo ondulado em 20,72%, relevo ondulado forte em 5,96%, áreas montanhosas apenas em 0,66% e relevo escarpado em 0,03% das terras agrícolas abandonadas.

**Figura 3.5** – Relação entre classes de declividade e áreas de concentração de abandono agrícola no Matopiba, Brasil.



**Fonte:** Dados da pesquisa e da EMBRAPA (1979).

As áreas abandonadas no Matopiba são predominantemente por relevo plano. No entanto, o abandono também é observado em certas áreas com declives mais acentuados, houve áreas agrícolas de abandono durante 2018-2021, em regiões específicas caracterizadas por altitudes mais elevadas na microrregião Dianópolis-TO.

Finalmente, para avaliar a relação entre as áreas de abandono de terras agrícolas e os tipos de solo, realizamos a interseção entre os dados  $AF_{2018-2021}$  e os dados de tipos de solo catalogados pela Sociedade Brasileira de Solos (EMBRAPA, 1979).

Observe que os tipos de solo mais abundantes nas áreas abandonadas são Latossolo Amarelo (21,19%), Argissolo Vermelho-Amarelo (16,91%), Plintossolo Pétrico (16,63%) e Latossolo Vermelho-Amarelo (11,16%). Os outros tipos de solo representaram apenas menos de 10% do total da área abandonada identificada (Tabela 3.3).

**Tabela 3.3** – Área de cada tipo de solo encontrado nas terras agrícolas abandonadas identificadas de acordo com os dados de  $AF_{2018-2021}$ .

Tipo de solo	Área (hectares)	(%)
Latossolo Amarelo	68.317	21,19
Argissolo Vermelho-Amarelo	54.575	16,91
Plintossolo Pétrico	53.655	16,63
Latossolo Vermelho-Amarelo	36.014	11,16
Plintossolo Háptico	31.811	9,86
Neossolo Quartzarênico	22.110	6,85
Neossolo Litólico	17.328	5,37
Gleissolo Háptico	10.100	3,13
Nitossolo Vermelho	7.811	2,42
Chernossolo Argilúvico	5.169	1,60
Cambissolo Háptico	4.624	1,43
Neossolo Flúvico	3.434	1,06
Total <sup>3</sup>	311.858	100

**Fonte:** Elaborado com base nos dados da EMBRAPA (1979).

Os Latossolos Amarelos e Vermelho-Amarelos são solos minerais, geralmente profundos e de baixa fertilidade natural. Embora sejam solos estáveis, o manejo inadequado pode torná-los vulneráveis à degradação. Esses solos são frequentemente utilizados na produção agrícola nos planaltos do oeste da Bahia, sudoeste do Piauí, sul do Maranhão e centro-sul do Tocantins. O Argissolo pertence ao grupo sedimentar Barreiras e possui baixa fertilidade, sendo comumente utilizado para pastagem. Os Plintossolos Pétricos são solos rasos com restrições agrícolas, mas também podem ser utilizados para pastagem (Lumbreras *et al.*, 2015a).

A aptidão agrícola dos solos foi relacionada ao abandono. A metodologia para avaliar a aptidão agrícola baseou-se em (Ramalho Filho e Beek, 1995), que considera as características dos ecossistemas para determinar as limitações ao uso agrícola e o potencial para mitigar essas restrições sob diferentes práticas de manejo. Essa classificação identifica o uso da terra mais intensivo possível para diversos fins, como cultivo, pastagens e silvicultura (Lumbreras *et al.*, 2015b).

A análise de aptidão agrícola revelou que a maior proporção de terras abandonadas no Matopiba pertence ao Grupo 2, que inclui terras classificadas como moderadamente aptas para a agricultura. Essas áreas corresponderam a 103.300 hectares (31,48%). O Grupo 3, composto por áreas com restrições significativas ao cultivo, representou 77.400 hectares (23,59%) das terras abandonadas. O Grupo 4, que inclui terras aptas para pastagem plantada com diferentes restrições, totalizou 60.900 hectares (18,56%).

<sup>3</sup> A área total do somatório das classes de tipos de solos foi menor que o total das áreas abandonadas em 2018 devido aos *pixels* sem dados.

As áreas protegidas e reservas ficaram em quarto lugar, com 31.300 hectares (9,54%) de terras abandonadas, sugerindo que os esforços de monitoramento ambiental têm sido eficazes em limitar as atividades agrícolas nessas zonas. O Grupo 6, formado por terras não aptas para uso agrícola, representou 30.200 hectares (9,20%) e pode demandar ações de restauração ambiental. As terras aptas para cultivo (Grupo 1) totalizaram 23.400 hectares (7,13%). Por fim, o Grupo 5, que inclui terras aptas para pastagem natural, cobriu apenas 1.600 hectares (0,49%) das áreas agrícolas abandonadas observadas na Tabela 3.4.

**Tabela 3.4** – Área de cada grupo de aptidão agrícola de acordo com os dados de terras agrícolas abandonadas de 2018.

	Aptidão agrícola	Hectares	%
Grupo 1 - Terras classificadas como de boa aptidão para cultivo		23.361	7,76
Grupo 2 - Terras classificadas como de aptidão moderada para cultivo		103.336	34,32
Grupo 3 - Terras classificadas como de aptidão restrita para cultivo		77.424	25,71
Grupo 4 - Terras com aptidão boa, moderada ou restrita para pastagem plantada		60.925	20,23
Grupo 5 - Terras com aptidão boa, moderada ou restrita para pastagem natural		1.605	0,53
Grupo 6 - Terras sem aptidão para uso agrícola		31.192	1,06
	Reservas	31.280	10,39
	Total <sup>4</sup>	301.123	100

**Fonte:** Elaborado com base nos dados da Lumbreras *et al.* (2015b).

As características ambientais das terras abandonadas no Matopiba evidenciam sua heterogeneidade. No entanto, alguns padrões predominantes emergem, como a predominância de terrenos planos, áreas moderadamente aptas à agricultura e o domínio dos Latossolos Amarelos. Esses achados destacam a necessidade de investimentos para reabilitar e reintegrar essas terras aos processos de produção de alimentos. Políticas públicas voltadas para práticas agrícolas sustentáveis e melhor gestão da terra serão essenciais para enfrentar esses desafios de forma eficaz.

Mesmo assim, a associação estatística medida pelo coeficiente de contingência de Pearson revelou uma baixa correlação entre o abandono agrícola e as variáveis ambientais no Matopiba, como tipo de solo ( $c = 0,03$ ), aptidão agrícola ( $c = 0,02$ ) e declividade ( $c = 0,01$ ). Isso sugere que não há uma relação de causa e efeito entre o abandono de terras agrícolas e fatores como declividade, tipo de solo e aptidão agrícola na região.

A baixa associação entre as variáveis indica que o abandono de terras no Matopiba não ocorre devido a um tipo específico de relevo, de solo ou de aptidão agrícola. Portanto,

<sup>4</sup> A área total do somatório das classes de aptidão agrícola foi menor que o total da área abandonada em 2018 devido aos *pixels* sem dados.

essas variáveis não foram utilizadas para prever o abandono de terras agrícolas no Matopiba, mas sim para caracterizar as áreas abandonadas.

### 3.3 Conclusão do capítulo

O objetivo deste estudo foi identificar e avaliar espacialmente as tendências de abandono de terras agrícolas ao longo dos anos no Matopiba. Os resultados revelaram 3.985.006 hectares de terras agrícolas abandonadas entre 2006 e 2021. Essas áreas, anteriormente cultivadas ou utilizadas como pastagem, apresentaram distribuição espacial heterogênea, com concentração significativa na porção oeste do Matopiba, formando um arco de abandono característico que se estende de norte a sul, predominantemente em áreas de relevo plano. Apesar dos incentivos voltados ao desenvolvimento agrícola na região, a persistência de áreas improdutivas revela uma potencial ameaça à segurança alimentar, principalmente à população que depende das atividades agrícolas para a própria sobrevivência (pequenos e médios agricultores). O abandono dessas terras pode ser atribuído a múltiplos fatores, incluindo investimentos insuficientes, acesso limitado a recursos para a produção agrícola, práticas inadequadas de manejo da terra e conflitos fundiários.

O abandono de terras agrícolas representa riscos ambientais e sociais. Ele aumenta a suscetibilidade à erosão e aos incêndios, ao mesmo tempo em que priva agricultores de renda e agrava vulnerabilidades no meio rural. Os resultados deste estudo ressaltam o papel fundamental de políticas públicas robustas para mitigar o abandono de terras agrícolas. Por meio do monitoramento das mudanças no uso e na cobertura da terra na região do Matopiba, esta pesquisa pode contribuir para a redução dos impactos econômicos, sociais e ambientais. Os resultados podem orientar políticas públicas voltadas à promoção de práticas sustentáveis de manejo da terra, ao fortalecimento da agricultura de pequena escala, à ampliação do acesso a monitoramento especializado e assistência técnica, bem como à facilitação do acesso ao crédito para investimentos agrícolas. A reestruturação das áreas abandonadas para apoiar a produção de alimentos pode reforçar a segurança alimentar e ampliar a sustentabilidade agrícola da região.

A identificação espacial das terras agrícolas abandonadas também permite o desenvolvimento de políticas públicas direcionadas às necessidades específicas. Embora a extensão de terras agrícolas abandonadas represente uma proporção relativamente pequena da área total do Matopiba, ela exige atenção significativa, especialmente nas regiões que fazem fronteira com o bioma Amazônico. Essas áreas enfrentam desafios associados

à exploração excessiva dos recursos naturais, o que exige políticas que priorizem o uso sustentável da terra e a atenção por parte dos formuladores de políticas públicas, dos atores do setor agrícola e dos pesquisadores, garantindo o envolvimento ativo na implementação dessas políticas, crucial para o futuro do Matopiba.

As políticas públicas devem priorizar a promoção da agricultura familiar, predominante nas microrregiões do Matopiba, como verificado em Santos *et al.* (2021). Ao fomentar práticas adequadas de manejo do solo e técnicas agrícolas sustentáveis, essas políticas podem revitalizar as terras abandonadas e contribuir para sistemas agrícolas mais resilientes. Intervenções direcionadas podem transformar áreas abandonadas em terras produtivas, enfrentando preocupações com a segurança alimentar ao mesmo tempo em que preservam a integridade ambiental.

#### **4 ANÁLISE HIERÁRQUICA DE PROCESSOS ESPACIAL PARA ESTUDO DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL DAS ÁREAS PROTEGIDAS DO OESTE DA BAHIA DO MATOPIBA, BRASIL**

No intuito de preservar a biodiversidade dos biomas, o Brasil instituiu as unidades de conservação a partir da Lei nº 9.985, no ano 2000, criou o Sistema Nacional de Conservação da Natureza, que, além da proteção ambiental, tem como objetivo a regularização da gestão dos recursos naturais. Nesse sentido, há duas categorias: a Proteção Integral e o Uso Sustentável (Carvalho, Silva e Salvio, 2022). A proteção integral tem por finalidade a conservação da biodiversidade e as áreas de uso sustentável possibilitam o uso dos recursos naturais, almejando também a conservação como finalidade complementar (Rylands e Brandon, 2005).

No Oeste da Bahia há seis principais áreas protegidas que se localizam no território de expansão do Matopiba, são elas Área de Proteção Ambiental (APA) de São Desidério, Área de Proteção Ambiental Bacia do Rio de Janeiro, Área de Proteção Ambiental Bacia do Rio Preto, Refúgio de Vida Silvestre das Veredas do Oeste Baiano, O Parque Nacional Grande Sertão Veredas e a Floresta Nacional (FLONA) de Cristópolis. O avanço das atividades agropecuárias na região pode colocar essas áreas protegidas em risco devido à pressão antrópica na expansão das atividades agrícolas. Além disso, mudanças climáticas podem também ameaçar a conservação de áreas protegidas.

A expansão das áreas agrícolas resultou em significativos impactos ambientais; apesar da prosperidade econômica do agronegócio no Oeste Baiano do Matopiba, não foi observada uma redução das desigualdades sociais e econômicas na região (Vieira *et al.*, 2021; Widmarck, 2020). Além disso, a intensidade do uso dos recursos naturais pela execução das atividades agrícolas tem gerado impactos ambientais no oeste da Bahia tais como perda de biodiversidade, diminuição da capacidade de absorção de água da chuva pelos solos, que afeta o abastecimento das águas subterrâneas (Ferreira, 2015). Diante desse cenário, torna-se fundamental avaliar a vulnerabilidade ambiental das unidades de conservação, de modo a subsidiar estratégias de manejo e planejamento territorial.

A avaliação da vulnerabilidade tem sido estudada desde a década de 1970 e ganhou maior visibilidade nos últimos anos devido às crescentes mudanças ambientais e do clima (Thirumurthy *et al.*, 2022). A utilização de métodos de análise multicritério, a exemplo da Análise Hierárquica de Processos (AHP), tem sido ampla na resolução de problemas com mais de um critério por diversas áreas do conhecimento que utilizaram a ferramenta, como ciências ambientais e engenharias (Yu *et al.*, 2021).

Este estudo tem como objetivo analisar a vulnerabilidade ambiental de seis áreas

protegidas do oeste da Bahia por meio de análise multicritério espacial baseada no método de Análise Hierárquica de Processos (AHP). Ao integrar variáveis ambientais e antrópicas, busca-se identificar zonas críticas de vulnerabilidade e discutir suas implicações para a conservação no contexto da expansão agrícola do Matopiba e avaliar as incertezas metodológicas associadas à ferramenta.

Para além dessa introdução, a seção seguinte apresenta uma descrição da área de estudo, descrevendo os diferentes tipos de áreas protegidas existentes na região, a metodologia da aplicação da Análise Hierárquica de processos, resultados e discussão e, por fim, a conclusão.

#### 4.1 Descrição da área de estudo

A área de estudo deste trabalho é constituída pelas principais áreas protegidas do Oeste da Bahia, são elas: APA de São Desidério, APA Bacia do Rio de Janeiro, APA Bacia do Rio Preto, Refúgio de Vida Silvestre das Veredas do Oeste Baiano, o Parque Nacional Grande Sertão Veredas, e a Floresta Nacional de Cristópolis. O interesse em estudar a vulnerabilidade ambiental nessas APAs está relacionado ao fato de que todas estão contidas, ou possuem parte da sua área contida, na fronteira agrícola do Matopiba, como pode ser visto na Figura 4.1.

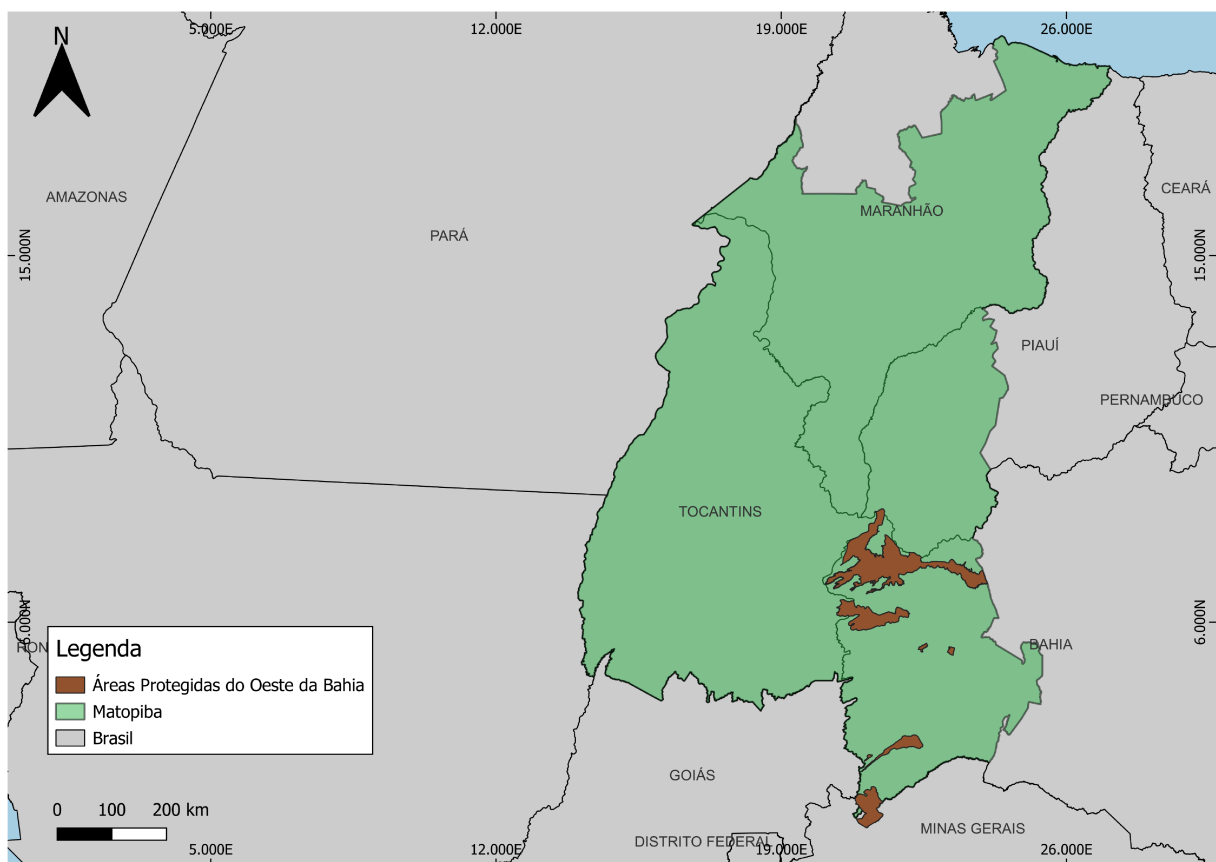
A APA de São Desidério está localizada no município de São Desidério, possui extensão territorial de 10.961 ha e foi criada em 2006 por meio do decreto estadual 10.020/2006 que determina os objetivos e delimita os tipos de uso da referida área de proteção. Dentre os objetivos da APA de São Desidério estão: promover o controle e gerenciamento dos usos dos recursos ambientais; preservar as características ambientais da área da APA; e incentivar e ordenar a criação de novas áreas de recreação, inclusive o turismo ecológico (Bahia, 2006).

A APA Bacia do Rio de Janeiro abarca os municípios de Barreiras e Luiz Eduardo Magalhães, com área total de 351.300 hectares. Foi criada através do decreto estadual 2.185 em 1993 e ampliada em 2001 por meio do decreto 7.971. Este último foi realizado com o objetivo de ampliar a área de proteção para garantir a inclusão de áreas de remanescentes do bioma Cerrado (Bahia, 2001). Dentre os objetivos do decreto estão: a criação do Zoneamento Ecológico-Econômico e planejamento de Gestão da APA; promover a construção de corredores ecológicos; analisar e emitir pareceres de licenciamento dos empreendimentos da área; fiscalizar as atividades efetuadas na área da APA respeitando a autarquia municipal (Bahia, 2001). Na Bacia do Rio de Janeiro, estima-se que a perda da

vegetação nativa para áreas de agricultura de sequeiro tenha ocasionado maiores perdas do solo devido à intensificação do processo erosivo (Santos e Queir, 2021).

A APA Bacia do Rio Preto foi criada em 2006 por meio do decreto estadual 10.019, com área total de 1.146.161,96 hectares. Ela está inserida nos biomas do Cerrado, Mata Atlântica e Caatinga e abrange os municípios Formosa do Rio Preto, Santa Rita de Cássia e Mansidão. Os objetivos da sua criação são consonantes com a preservação dos recursos ambientais e a regulação das atividades implementadas na área protegida para garantir a proteção e preservação ambiental (Brasil, 2006a).

**Figura 4.1** – Principais áreas protegidas do Oeste da Bahia.



**Fonte:** Elaborado com base nos dados da EMBRAPA (2015)

O Refúgio de Vida Silvestre do Oeste Baiano foi criado em 2002 com o objetivo de garantir a existência e a reprodução de espécies de fauna e flora daquela localidade, se enquadra no grupo de proteção integral de responsabilidade federal, com abrangência de 128.521 ha entre os municípios de Jaborandi e Cocos (Brasil, 2002).

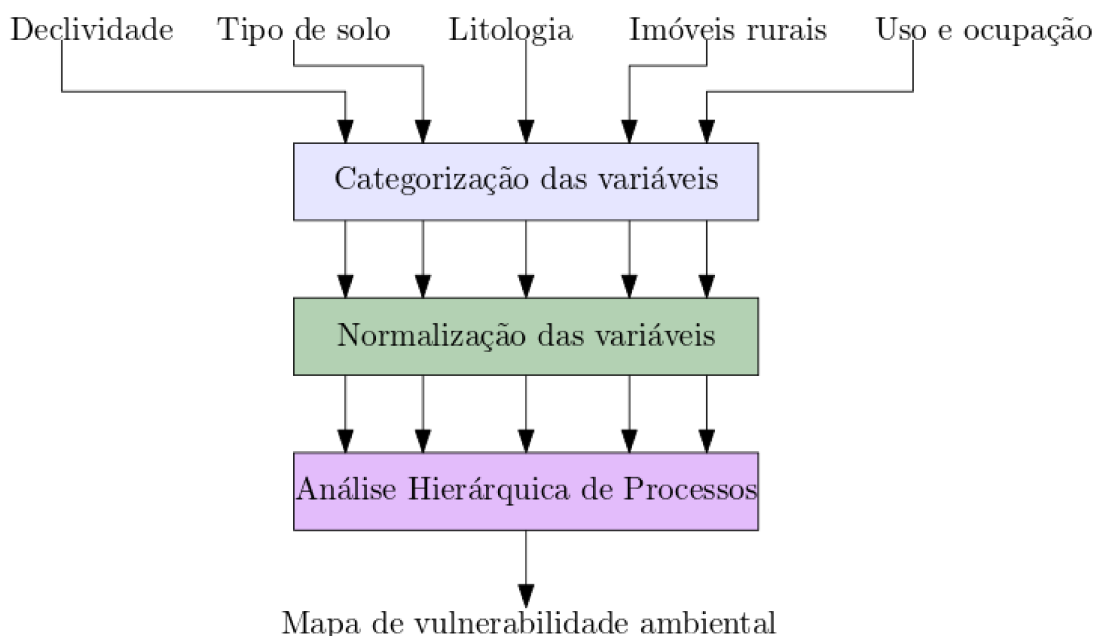
O Parque Nacional Grande Sertão Veredas é uma área de proteção integral que possui área de 231.000 ha, localiza-se nos municípios de Chapada Gaúcha, Formoso e Arinos no estado de Minas Gerais e Cocos na Bahia, foi criado em 1989 por meio do decreto federal 97.658 (Brasil, 1989).

A Floresta Nacional de Cristópolis foi criada em 2001 por meio de decreto federal, possui área de 11.953 ha, predominante, apresenta fitofisionomias do bioma Caatinga e tem como objetivos principais o manejo de recursos naturais, hídricos, da biodiversidade, apoio às ações de recuperação de áreas degradadas e ao desenvolvimento sustentável dos recursos naturais (Brasil, 2001).

#### 4.2 Metodologia para construção do índice de vulnerabilidade ambiental via análise multicritério espacial

A metodologia adotada para obter um índice de vulnerabilidade ambiental é apresentada nesta seção. De forma geral, a metodologia pode ser dividida em três etapas: coleta dos dados, categorização e normalização das variáveis, e aplicação da AHP para obtenção do índice de vulnerabilidade ambiental. As etapas estão ilustradas na Figura 4.2. Todas as etapas que envolvem o processamento dos dados espaciais foram realizadas no Qgis 3.28. As cinco variáveis utilizadas como critérios de análise são variáveis de declividade, tipo de solo, litologia, delimitação dos imóveis rurais e uso e ocupação do solo. Todas essas variáveis são categorizadas de acordo com ponderações específicas para cada uma e são normalizadas para poderem ser submetidas à AHP. Após aplicação da AHP, os cinco critérios são combinados a partir de uma soma ponderada para obtenção do índice de vulnerabilidade ambiental.

**Figura 4.2** – Metodologia para construção do índice de vulnerabilidade ambiental via Análise Hierárquica de Processos.



**Fonte:** Elaboração própria com base nos dados da pesquisa.

#### 4.2.1 Aquisição dos dados

Neste trabalho foram utilizados dados de geoprocessamento para obter o índice de vulnerabilidade ambiental. Os dados coletados correspondem às bases cartográficas das APAs do Oeste da Bahia na projeção UTM (Universal Transverse Mercator), Datum SIRGAS 2000, Zona 23 Sul. A base de dados cartográfica foi composta por cinco variáveis das áreas protegidas, que são os dados cartográficos de declividade, pedologia (tipo de solo), litologia, delimitação dos imóveis rurais e uso e ocupação dos solos. As fontes de coleta de cada uma das variáveis consideradas estão apresentadas na Tabela 4.1.

**Quadro 4.1** – Fontes de coleta dos dados utilizados como critérios para obtenção do índice de vulnerabilidade ambiental no Oeste da Bahia.

Dados	Fonte
Litologia	Serviço Geológico Do Brasil (CPRM, 2010)
Pedologia	Serviço Geológico Do Brasil (CPRM, 2010)
Declividade	TOPODATA (INPE, 2015)
Uso e ocupação do solo	MapBiomass collection 7.1 (MapBiomass, 2021)
Imóveis rurais	Cadastro Ambiental Rural (Brasil, 2023a)

**Fonte:** Elaboração própria.

As bases cartográficas de litologia, pedologia e declividade correspondem à fragilidade natural (Crepani *et al.*, 2001), enquanto que as cartas de uso e cobertura do solo e imóveis rurais correspondem ao risco associado às atividades antrópicas. Logo, essas cinco variáveis fornecem informação útil para obtenção de um índice de vulnerabilidade ambiental.

#### 4.2.2 Categorização e normalização dos critérios

Esta seção apresenta o procedimento adotado para categorizar os critérios em diferentes níveis de vulnerabilidade e a normalização das cartas categorizadas. A carta de declividade foi categorizada em uma escala de 1 a 6, sendo que 1 indica baixa vulnerabilidade e 6 indica alta vulnerabilidade. Já as cartas de litotogia, pedologia e uso e ocupação do solo foram classificadas em uma escala de 1 a 3, conforme a vulnerabilidade, sendo que 1 indica baixa vulnerabilidade e 3 alta vulnerabilidade. Para os dados cartográficos dos imóveis rurais, obteve-se o centroide de cada imóvel rural e, em seguida, dados matriciais (*raster*) da densidade de imóveis rurais foram obtidos via estimativa de densidade de Kernel<sup>1</sup>.

A Tabela 4.1 apresenta os valores das ponderações adotadas para categorização das classes de declividade de acordo com o nível de vulnerabilidade. As categorias de

<sup>1</sup> A densidade de Kernel é calculada com base na densidade de pontos em uma certa área, de modo que valores maiores são obtidos quando há mais pontos agrupados.

declividade adotadas são as propostas pela EMBRAPA (1979). A declividade está associada a inclinação do relevo em relação ao horizonte e à velocidade da erosão pelas massas de água. Assim, quanto maior a declividade, maior será a velocidade das massas de água e o transporte no processo erosivo (Crepani *et al.*, 2001). Deste modo, na ponderação do critério declividade, quanto maior for a declividade percentual, maior será o peso atribuído à vulnerabilidade associada ao grau de inclinação do relevo.

**Tabela 4.1** – Categorização das classes de declividade de acordo com o nível de vulnerabilidade. O nível 1 indica baixa vulnerabilidade e o nível 6 alta vulnerabilidade.

Declividade (%)	Relevo	Peso
0 - 3	Plano	1
3 - 8	Suave-ondulado	2
8 - 20	Ondulado	3
20 - 45	Forte-ondulado	4
45 - 75	Montanhoso	5
> 75	Forte-montanhoso	6

**Fonte:** Adaptado de EMBRAPA (1979).

As áreas de proteção do Oeste da Bahia que compõem o Matopiba possuem características majoritariamente de baixa declividade, com algumas áreas de relevo ondulado e montanhoso. Além da declividade, a litologia apresenta influência no processo de morfogênese. As rochas e a intensidade de coesão estão também relacionadas aos processos erosivos, rochas com pouca coesão apresentam maior tendência a serem impactadas pela erosão e as rochas mais coesas resistem com maior força ao intemperismo (Crepani *et al.*, 2001).

A Tabela 4.2 apresenta os valores das ponderações adotadas para categorização das classes de litologia de acordo com o nível de vulnerabilidade. A ponderação foi adaptada da classificação de vulnerabilidade a processos erosivos de (Crepani *et al.*, 2001). A vulnerabilidade das rochas foi baseada na classificação de Crepani *et al.* (2001). As classes variaram de 1 a 3: quanto mais próximo de 1, indicam maior estabilidade da rocha e, conseqüentemente, menor vulnerabilidade; e valores mais próximos de 3 indicaram maior vulnerabilidade da rocha ao processo erosivo. A escala de vulnerabilidade do autor considerou o grau de coesão dos diferentes tipos de rochas e a ação do intemperismo.

A Tabela 4.3 apresenta os valores das ponderações adotadas para categorização do mapa de uso e ocupação em relação ao risco à vulnerabilidade. A classificação do critério foi dada de acordo com o potencial de impacto negativo da atividade antrópica, no intervalo entre 1 e 3, quanto mais próximo do nível 1 indica baixa vulnerabilidade e quanto mais próximo do nível 3 alta vulnerabilidade.

**Tabela 4.2** – Categorização das classes de litologia de acordo com o nível de vulnerabilidade. O nível 1 indica baixa vulnerabilidade e o nível 3 indica alta vulnerabilidade.

Litologia	Peso
Silte, Areia, Argila	2.7
Silte, Cascalho, Argila	2.7
Mármore, Metamarga	2
Conglomerado, Arenito conglomerático, Pelito, Arenito	1.5
Quartzito feldspático, Metaconglomerado, Filito	1
Conglomerado, Arenito conglomerático, Pelito, Arenito	1.5
Metassiltito, Quartzito feldspático, Mica xisto	2.1
Metassiltito, Mármore, Metamarga	2.1
Conglomerado, Arenito conglomerático, Pelito, Arenito	1.5
Argilito, Siltito	2.7
Quartzito feldspático, Metaconglomerado, Filito	1
Silte, Areia, Argila	2.7
Metaconglomerado	2
Metarenito feldspático, Mármore	1.5
Arenito, Conglomerado, Folhelho, Siltito	2
Arcóseo, Argilito, Siltito	2.7

**Fonte:** Adaptado de Crepani *et al.* (2001).

**Tabela 4.3** – Categorização das classes de pedologia (tipos de solos) de acordo com o nível de vulnerabilidade. O nível 1 indica baixa vulnerabilidade e o nível 3 alta vulnerabilidade.

Tipos de solos	Peso
Cambissolo Háptico	2.5
Gleissolo Háptico	3
Latossolo Amarelo	1
Neossolo Litólico	3
Neossolo Quartzarênico	3
Planossolo Hidromórfico	2

**Fonte:** Adaptado de Crepani *et al.* (2001).

A Tabela 4.4 apresenta os valores das ponderações adotadas para categorização das classes de pedologia de acordo com o nível de vulnerabilidade. Para a classificação da vulnerabilidade dos tipos de solos, foi realizada a adaptação da classificação de (Crepani *et al.*, 2001).

Após a categorização dos critérios de declividade, pedologia, litologia e uso e ocupação dos solos, e a obtenção da densidade de Kernel de imóveis rurais, todos os cinco critérios foram normalizados entre 0 e 1 da seguinte forma:

$$X_{\text{normalizado}} = \frac{X - \min(X)}{\max(X) - \min(X)}, \quad (4.1)$$

**Tabela 4.4** – Categorização das classes de uso e ocupação do solo de acordo com o nível de vulnerabilidade. O nível 1 indica baixa vulnerabilidade e o nível 3 alta vulnerabilidade.

Classe de uso e ocupação do solo	Peso	Classe de uso e ocupação do solo	Peso
Formação Vegetal	1	Outras áreas não vegetadas	3
Formação Savânica	1	Afloramento Rochoso	3
Floresta Plantada	1	Rios e lagos	1
Campo Alagado e Área Pantanosa	1	Soja	3
Formação Campestre	1.3	Lavouras Temporárias	3
Pastagem	3	Café	1.5
Mosaico de Agricultura e Pastagem	3	Lavouras Perenes	1.8
Infraestrutura Urbana	2	Algodão	3

**Fonte:** Adaptado de Crepani *et al.* (2001).

onde  $X$  é a variável de interesse,  $\max(X)$  o seu valor máximo,  $\min(X)$  o seu valor mínimo, e  $X_{\text{normalizado}}$  é o valor normalizado da variável.

#### 4.2.3 Análise Hierárquica de Processos (AHP)

Para aplicação da AHP, é necessário que os critérios sejam normalizados. A normalização dos critérios é, por si só, um desafio, pois a comparação par a par entre os critérios deve ser positiva. Essas relações positivas são normalmente obtidas a partir da definição de escalas para as variáveis associadas aos critérios e, então, realiza-se a normalização a partir dos valores de máximo e mínimo da escala definida. Como a definição dos valores desta escala baseia-se na escolha de intervalos a serem associados a cada valor da escala, esta etapa já introduz incerteza na análise.

As condições para aplicação da AHP e a realização da comparação par a par entre os critérios são: todas as comparações serem positivas, a diagonal principal da matriz de comparação ser sempre igual a 1 e ser uma matriz recíproca. Isso significa que o triângulo superior da matriz é sempre o inverso do triângulo inferior (Ishizaka e Nemery, 2013). O número de comparações necessárias entre os critérios é definido como

$$\frac{n(n-1)}{2}, \quad (4.2)$$

onde  $n$  é o número de critérios.

Com a obtenção da matriz de comparação par a par, testa-se a consistência para identificar contradições na análise. Para isso, a AHP considera até 10% de inconsistência em comparação com a inconsistência média de 500 matrizes preenchidas aleatoriamente (Ishizaka e Nemery, 2013). Em outras palavras, a matriz de comparação a par a par é considerada consistente se cumprir os pressupostos de transitividade e reciprocidade. A

transitividade é definida por:

$$a_{ij} = a_{ik}a_{kj} \quad (4.3)$$

onde  $a_{ij}$  é a comparação entre os critérios  $i$  e  $j$ . Como exemplo, suponha que um certo indivíduo goste de pequi duas vezes mais que de azeitona e de azeitona três vezes mais que de pimenta. Então, ele gosta de pequi seis vezes mais que pimenta. Assim, a transitividade é considerada.

Por outro lado, a reciprocidade é definida por Ishizaka e Nemery (2013):

$$a_{ij} = 1/a_{ji}. \quad (4.4)$$

A regra da reciprocidade está relacionada a caso em que, por exemplo, alguém gosta duas vezes mais de melancia que de maçã. Isso significa que essa pessoa gosta de maçã metade do que gosta de melancia.

Ainda de acordo com Ishizaka e Nemery (2013), supondo-se que as preferências  $p_i$  são conhecidas, a matriz consistente pode ser definida por:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} p_1/p_1 & \cdots & p_1/p_j & \cdots & p_1/p_n \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_i/p_1 & \cdots & 1 & \cdots & p_i/p_n \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_n/p_1 & \cdots & p_n/p_j & \cdots & p_n/p_n \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

sendo que  $a_{ij}$  atende o critério de igualdade de  $a_{ij} = p_i/p_j$ , onde  $p_i$  é a prioridade alternativa do  $i$ -ésimo critério.

As prioridades não são conhecidas inicialmente na AHP. No entanto, como as prioridades só fazem sentido em matrizes consistentes ou quase consistentes. O método mais comum utilizado para checar a consistência da matriz é o índice de consistência (CI) desenvolvido por Saaty (1977), que é dado por

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (4.6)$$

onde  $\lambda_{\max}$  é o máximo autovalor. A razão de consistência é então definida como

$$CR = \frac{CI}{RI}, \quad (4.7)$$

onde  $RI$  é o índice aleatório, que é o  $CI$  médio de 500 matrizes preenchidas aleatoriamente. Se o  $CR$  for maior que 10%, então a matriz é considerada consistente. Para determinar o valor de  $RI$ , (Saaty, 1977) propôs os índices  $RI$  fornecidos na Tabela 4.5.

Para definir os valores das prioridades (pesos), pode-se utilizar o método do autovalor. Este método consiste em obter o vetor de prioridades resolvendo a seguinte

**Tabela 4.5** – Valores de  $RI$  propostos por Saaty (1977).

$n$	3	4	5	6	7	8	9	10
$RI$	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

**Fonte:** Dados da pesquisa

equação (Ishizaka e Nemery, 2013):

$$\mathbf{A}\mathbf{p} = n\mathbf{p}, \quad (4.8)$$

onde  $n$  é a dimensão de  $\mathbf{A}$  e  $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_j, \dots, p_n)$  é o vetor de prioridades. Esta equação pode ser escrita como

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_n \end{bmatrix} = n \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_n \end{bmatrix}, \quad (4.9)$$

que resulta em um conjunto de  $n$  equações lineares cuja solução fornece os valores das prioridades.

Por exemplo, considere a matriz  $\mathbf{A}$  dada por Ishizaka e Nemery (2013):

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 6 & 3 \\ 1/6 & 1 & 1/2 \\ 1/3 & 2 & 1 \end{bmatrix}.$$

Logo,  $n = 3$ , e tem-se a seguinte equação

$$\begin{bmatrix} 1 & 6 & 3 \\ 1/6 & 1 & 1/2 \\ 1/3 & 2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} = 3 \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix}$$

ou ainda,

$$\begin{aligned} p_1 + 6p_2 + 3p_3 &= 3p_1 \\ p_1/6 + p_2 + p_3/2 &= 3p_2 \\ p_1/3 + 2p_2 + p_3 &= 3p_3. \end{aligned}$$

Esse conjunto de equações resulta em  $p_1 = 0.667$ ,  $p_2 = 0.111$ ,  $p_3 = 0.222$ , sendo que  $p_1 + p_2 + p_3 = 1$ .

Finalmente, após a obtenção das prioridades  $p_1, \dots, p_n$  associadas aos critérios  $X_j$ ,  $j = 1, \dots, n$ , o índice de vulnerabilidade ambiental é obtido a partir da soma ponderada dos critérios normalizados pelas prioridades:

$$IVA = \sum_{j=1}^n p_j X_j, \quad (4.10)$$

Onde  $X_j$  é o  $j$ -ésimo critério e  $p_j$  a sua prioridade obtida via AHP. Note que a soma das prioridades vale 1, logo, como os critérios são normalizados entre 0 e 1, o índice *IVA* também está definido entre 0 e 1. Para avaliar e interpretar o índice, propõe-se a categorização apresentada na Tabela 4.6.

**Tabela 4.6** – Classes de vulnerabilidade ambiental.

Classes	<i>IVA</i>
Muito fraca	0,00 - 0,20
Fraca	0,20 - 0,40
Média	0,40 - 0,60
Forte	0,60 - 0,80
Muito forte	0,80 - 1,00

**Fonte:** Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

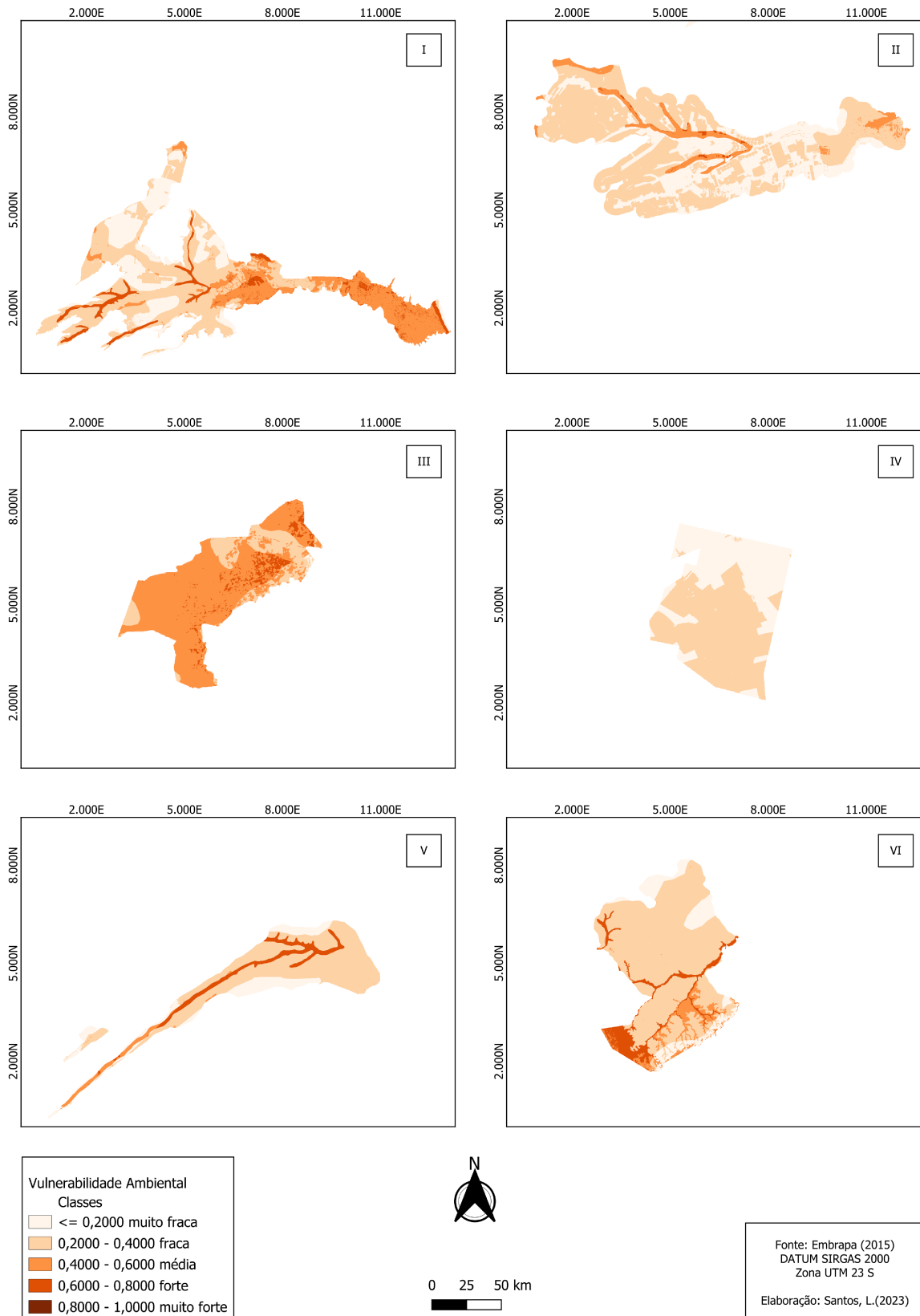
### 4.3 Resultados e discussão

#### 4.3.1 Caracterização da vulnerabilidade ambiental das APAs do Oeste da Bahia

O resultado da AHP resultou em cinco classes de vulnerabilidade ambiental, variando de muito fraca a muito forte. Considerando o conjunto das áreas protegidas do oeste da Bahia, predominam as classes fraca (49,4%) e média (15,9%), seguidas por áreas muito fraca (20,9%) e forte (6,1%). Apenas 0,01% da superfície analisada apresentou vulnerabilidade muito forte. Esse panorama geral sugere que, embora a maior parte das áreas protegidas mantenha baixa fragilidade, porções específicas revelam susceptibilidade acentuada a processos de degradação (Figura 4.3).

Ao se comparar as diferentes categorias de unidades de conservação, observa-se que as Áreas de Proteção Ambiental (APAs) concentram as maiores proporções de vulnerabilidade média a forte, especialmente nas margens de rios e nas porções centrais das APAs da Bacia do Rio Preto e de São Desidério. Nesses casos, litologia arenítica, declividade e intensidade de uso do solo contribuíram de forma significativa para o aumento da fragilidade. Já a APA da Bacia do Rio de Janeiro apresentou maior resiliência relativa, com predominância das classes fraca e muito fraca (Tabela 4.7).

**Figura 4.3** – Mapa da vulnerabilidade ambiental das áreas protegidas do Oeste da Bahia: I) Área de Proteção Formosa do Rio Preto, II) Área de Proteção Ambiental Bacia do Rio de Janeiro, III) Área de Proteção Ambiental São Desidério, IV) Flona de Cristópolis, V) Revis das Veredas do Oeste Baiano, VI) Parna Grande Sertão Veredas.



**Fonte:** Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa

Nas unidades de proteção mais restritivas, como o Parque Nacional Grande Sertão Veredas e o Refúgio de Vida Silvestre das Veredas do Oeste Baiano, as vulnerabilidades mais elevadas foram identificadas em áreas próximas aos cursos d'água, indicando a importância da vegetação ciliar como elemento de contenção de processos erosivos. A Floresta Nacional de Cristópolis, por sua vez, apresentou o melhor desempenho ambiental, com predominância absoluta de vulnerabilidade fraca e muito fraca, refletindo tanto sua menor pressão antrópica quanto seu regime de manejo sustentável (Figura 4.3, Tabela 4.7).

**Tabela 4.7** – Área correspondente a cada uma das classes de vulnerabilidade ambiental.

Classes	Área (hectares)	Área (%)
Muito fraca	421.222	20,86
Fraca	997.283	49,39
Média	320.868	15,89
Forte	123.948	6,14
Muito forte	156	7,73
Total	2.019.321	100

**Fonte:** Dados da pesquisa.

Esses resultados evidenciam que o grau de vulnerabilidade não depende apenas das características ambientais, mas também do enquadramento legal e da efetividade do manejo. Enquanto as APAs permitem usos agropecuários e residenciais mais intensivos, resultando em maiores áreas vulneráveis, categorias como Parque Nacional e Refúgio de Vida Silvestre restringem atividades e apresentam maior resiliência ambiental. Essa diferenciação reforça a necessidade de políticas de fiscalização contínua e de integração entre instrumentos de planejamento agropecuário e ambiental no oeste da Bahia.

A AHP é uma ferramenta apta para avaliação da vulnerabilidade em sistemas ambientais; no entanto, há algumas incertezas metodológicas. A utilização de inúmeros critérios dificulta a construção da matriz de consistência. A escala de comparação de 1 a 9 pode ser restritiva quando problemas mais complexos estão sendo avaliados.

#### 4.4 Conclusão do capítulo

A aplicação da análise hierárquica possibilitou a identificação das áreas de vulnerabilidade ambiental das áreas protegidas no oeste da Bahia. O estudo considerou diferentes tipos de áreas de proteção ambiental, como as áreas protegidas, a APA da Bacia do Rio de Janeiro, a APA do Rio Preto, a APA de São Desidério, o Parque Nacional Grande Sertão Veredas, o Refúgio de Vida Silvestre do Oeste da Bahia e a FLONA de

Cristópolis. A hipótese levantada sobre os impactos das atividades humanas ligadas à agropecuária nas áreas protegidas foi confirmada em alguns casos, embora a área total de áreas com vulnerabilidade muito forte tenha sido ínfima; houve diferenciações entre as distintas categorias de áreas protegidas. A categoria de área protegida, como a FLONA de Cristópolis, denotou apenas áreas de fraca a muito fraca vulnerabilidade em toda a sua área. A APA de São Desidério, por outro lado, apresentou forte vulnerabilidade na maior parte de sua área. As diferenças entre as categorias de unidades de conservação, como as FLONAs, também se refletem na determinação das atividades permitidas; no caso das FLONAs, por exemplo, impõem-se maiores restrições quanto às atividades econômicas e ao uso dos recursos naturais. Observou-se, ainda, que as áreas com maiores fragilidades ambientais estavam localizadas próximas aos cursos d'água.

A conservação das áreas protegidas é um mecanismo legalmente garantido em diversas áreas do Brasil e serve para preservar e gerir recursos naturais. Ainda assim, para a efetivação da conservação de ecossistemas, são necessários outros mecanismos para que a proteção ocorra e se mantenha ao longo dos anos, como fiscalização, educação ambiental, políticas de gestão sustentável dessas áreas. Nesse sentido, evidencia-se que as áreas com maior vulnerabilidade necessitam de maior atenção quanto aos critérios utilizados na avaliação e à necessidade de maior integração entre o planejamento agropecuário e as políticas ambientais.

A partir das variáveis utilizadas para caracterizar a vulnerabilidade ambiental, foi possível identificar as fragilidades associadas a fenômenos ambientais e à pressão das atividades humanas sobre essas áreas. As limitações na aplicação da AHP neste estudo consistiram na dificuldade de construir a matriz de preferências para a obtenção dos pesos e na imprecisão na definição dos limites na categorização das variáveis. No entanto, para futuros estudos, recomenda-se utilizar informações sobre os aspectos sociais e econômicos dessas áreas protegidas para uma perspectiva mais ampla.

Assim, este capítulo não apenas caracteriza as vulnerabilidades específicas das Unidades de Conservação do Oeste baiano, mas também evidencia a importância de tratar as incertezas metodológicas da análise multicritério. Os achados aqui apresentados fortalecem a tese de que a conservação ambiental e a sustentabilidade agropecuária devem ser tratadas de forma articulada.

## **5 AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE AGROAMBIENTAL NO MATOPIBA USANDO ANÁLISE MULTICRITÉRIO ESPACIAL BASEADA EM LÓGICA FUZZY**

O setor agropecuário tem participação importante na economia brasileira e é responsável pelo provimento de alimentos para abastecer a população do país. O Brasil apresenta diversos produtos dinâmicos para o mercado interno e internacional, como algodão, milho, leite, carne suína, carne de frango, soja, açúcar, manga, mamão papaia, uva e melão e na produção de grãos, estima-se a projeção do crescimento de 196,5 milhões de toneladas em 2015/16 para 255,3 milhões em 2025/26 (MAPA, 2016). No entanto, as atividades agropecuárias têm gerado diversos impactos ambientais, tais como a contaminação dos solos, intensificação de processos erosivos, riscos à saúde da população e dos trabalhadores rurais e perda de biodiversidade (Bini *et al.*, 2018).

A sustentabilidade na agricultura pode ser entendida a partir das práticas agrícolas que priorizem a redução de impactos ambientais, para isso presume-se o manejo adequado dos solos, proximidade na relação entre produtores e consumidores, uso de insumos agrícolas sustentáveis (Botega *et al.*, 2020). A FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*) designou a agricultura sustentável como a existência de manejo e a conservação dos recursos naturais de forma a atender às necessidades humanas e à manutenção de recursos para gerações futuras (FAO, 2016; Weid, 2010).

A Sustentabilidade na Agropecuária pode ser compreendida como o conjunto de práticas e ações que asseguram a manutenção dos recursos naturais para as futuras gerações e promovem o equilíbrio entre os seus três pilares: meio ambiente, economia e sociedade (Sambuichi *et al.*, 2014; Opon e Henry, 2020). A demanda por alimentos e a expansão das atividades agropecuárias evidenciam a necessidade e importância da adoção de práticas direcionadas para a sustentabilidade agroambiental em escala global para minimizar os impactos negativos comumente atrelados a essas atividades.

O Governo e instituições estabeleceram algumas políticas para viabilizar a sustentabilidade na agricultura, como o plano ABC (Plano de Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária), Pronaf (Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar), o CAR (Cadastro Ambiental Rural), Programa de Apoio a regularização Ambiental de Imóveis Rurais, e o Programa de Desenvolvimento da Agricultura Orgânica (Bini *et al.*, 2018; Sambuichi *et al.*, 2014). Apesar das iniciativas para conciliar a expansão da produção agrícola, a redução dos impactos ambientais ainda é um desafio, especialmente em regiões de rápida expansão agrícola.

O Matopiba foi criado em 2015 por decreto federal após uma série de políticas de estímulo à expansão da agricultura e pecuária em uma região que abrange as regiões Norte e Noroeste do Brasil com forte presença do bioma Cerrado<sup>1</sup>. A região tem apresentado aumento considerável na produção de grãos e mudança no uso e ocupação das terras, provenientes da criação de novas áreas agrícolas (Bolfe *et al.*, 2016; Gomes *et al.*, 2017). Essas ações têm resultado em uma série de impactos como a supressão da vegetação nativa do Cerrado (Vieira *et al.*, 2021), bioma que ocupa maior parte da região.

No ano de 2023, o Governo Federal publicou o decreto nº 11.767 que trata sobre o Plano de Desenvolvimento Agropecuário e Agroindustrial do Matopiba com o objetivo de fomentar e orientar políticas públicas voltadas ao desenvolvimento econômico, ambiental e social de maneira sustentável (Brasil, 2023b). O decreto especifica a promoção de programas e projetos que promovam o desenvolvimento agropecuário baseado na sustentabilidade agroambiental e na gestão territorial.

A avaliação da sustentabilidade pode ocorrer por meio da elaboração de indicadores múltiplos que possibilitem o suporte à tomada de decisão. Logo, é um problema que pode ser estudado sob a ótica da análise multicritério devido a multiplicidade de conceitos associados à sustentabilidade (Opon e Henry, 2020). Mesmo não havendo um método padrão para medir a sustentabilidade agrícola, o estudo de Talukder *et al.* (2020) apontou que as abordagens baseadas em Análise de Decisão Multicritério (MCDA, do inglês *Multi-Criteria Decision Analysis*) são apropriadas para gerar indicadores de sustentabilidade levando em conta os aspectos de sustentabilidade na agricultura. De fato, como os agentes tomadores de decisão frequentemente se deparam com a complexa tarefa de balancear o conflito de interesses entre os três pilares da sustentabilidade, que naturalmente possuem natureza multidimensional e podem ser monetários e não-monetários, a MCDA se mostra como uma abordagem consistente para auxiliar a tomada de decisão (Opon e Henry, 2020). Além disso, considerar contextos territoriais específicos permite obter avaliações mais realistas das especificidades da área de estudo de modo a determinar ações de planejamento adequadas para sustentabilidade (Boggia *et al.*, 2018).

Nas ações de gestão e planejamento, os dados geográficos são comumente utilizados por pesquisadores, elaboradores e tomadores de decisão no âmbito das políticas públicas, pois colaboram com o entendimento da localização das problemáticas (Malczewski, 1999). Quando essas informações são incluídas na MCDA, tem-se a chamada MCDA espacial (Boggia *et al.*, 2018). Na MCDA e MCDA espacial, algumas etapas envolvem escolhas metodológicas que podem representar escolhas subjetivas dos decisores ou projetistas. No caso da avaliação da sustentabilidade, isso representa uma dificuldade, pois não

---

<sup>1</sup> Cerrado é o bioma composto por savana tropical que possui maior diversidade florística do que outros tipos de savanas do mundo (Polizel *et al.*, 2021)

há um modelo padrão para avaliar a sustentabilidade e por isso a MCDA para avaliação da sustentabilidade é afetada por essa incerteza (Opon e Henry, 2020), especialmente no que se diz respeito ao tratamento e agregação dos critérios. Uma das formas de tratar incertezas associadas ao julgamento dos decisores dentro da análise multicritério é a utilização da lógica *fuzzy* (Silva, 2020).

Mesmo que a sustentabilidade agroambiental tenha sido mencionada no Plano de Desenvolvimento Agropecuário do Matopiba, não há uma metodologia sistemática para quantificar a sustentabilidade agroambiental. Além disso, os estudos acerca dessa temática ainda são incipientes, especialmente no Matopiba, como pode ser notado pelas análises bibliométricas realizadas nos capítulos 2 e 3 desta Tese. Esse fato evidencia uma lacuna significativa na literatura e justifica a necessidade de investigar este tema no contexto do Matopiba. Outro aspecto evidenciado foi a lacuna significativa na literatura em relação à análise da sustentabilidade agroambiental utilizando a análise multicritério *fuzzy*.

Tal evidência aponta para a necessidade de investigações mais aprofundadas nesse campo, visando o desenvolvimento de instrumentos para subsidiar a avaliação da sustentabilidade agroambiental e a tomada de decisão. A expansão e o crescimento do modelo atual de produção agrícola podem intensificar impactos ambientais. Em vista do exposto, o objetivo deste capítulo é construir um Indicador de Sustentabilidade Agroambiental para o Matopiba. Para isso, utilizou-se a metodologia de Análise Multicritério Espacial *Fuzzy* para selecionar, normalizar, ponderar e agregar os indicadores individuais que compõem este índice.

Em vista disso, é notável a necessidade de avaliar a sustentabilidade agroambiental no Matopiba utilizando uma abordagem de análise multicritério espacial *fuzzy*, que é o objetivo principal deste capítulo. Este estudo pode contribuir para a elaboração de políticas públicas que considerem o aspecto da sustentabilidade agroambiental no Matopiba. Além disso, a proposta metodológica para quantificar sustentabilidade agroambiental na fronteira agrícola pode ser adaptada para outros sistemas agrícolas de diferentes escalas geográficas.

Este capítulo está organizado em quatro seções além desta introdução. A seção 5.1 discutiu brevemente a perspectiva da sustentabilidade nas atividades agrícolas. A Seção 5.2 apresenta a metodologia de análise multicritério espacial baseada em lógica *fuzzy*. Na seção 5.3 são apresentadas as ferramentas de análise dos padrões espaciais dos cenários de sustentabilidade agroambiental. Na Seção 5.4, encontram-se a descrição dos dados utilizados para a construção dos critérios e os detalhes da aplicação da metodologia no Matopiba. A Seção 5.5 apresenta os resultados obtidos e a discussão. Por fim, a Seção 5.6 apresenta a conclusão deste capítulo.

## 5.1 Breve discussão sobre sustentabilidade nas atividades agrícolas brasileiras

A agricultura brasileira é marcada por características do latifúndio, das monoculturas, da concentração fundiária e do trabalho de mão de obra escravizada. Essas características advêm do seu passado colonial, tendo como marco legal da mudança da posse de terras a Lei de Terras, criada em 1850, que determinava a posse de terra apenas por meio da compra, estabelecendo assim uma relação capitalista com a terra (Miralha, 2006). Além disso, a modernização conservadora da agricultura no período ditatorial contribuiu para a manutenção da concentração fundiária e para uma produção voltada às necessidades do mercado externo (Delgado, 2009). Essa construção histórica da agricultura brasileira contribuiu para o crescimento de uma população que se encontra às margens da grande produção: os pequenos agricultores, a população que vive da agricultura de subsistência e outros. Após o período ditatorial, na democratização do Brasil, evidenciaram-se os movimentos que reivindicavam reformas no campo, como o Movimento Sem Terra.

Hoje a agricultura brasileira carrega as características do seu passado histórico e é também reconhecida como grande produtora e exportadora de alimentos numa escala mundial. Essa característica se deu principalmente a partir dos anos 2000, em específico, em 2008, com a corrida mundial por terras (Pereira e Pauli, 2016). Nesse período houve uma maior abertura para empresas estrangeiras e subsídios governamentais que fomentaram a expansão do agronegócio. No caso do Matopiba, o capital estrangeiro contribuiu para o aumento da especulação de terras e, além do capital externo, a região foi beneficiada por ações do Estado que se resumem basicamente a investimentos em inovações tecnológicas, apoio às pesquisas científicas e acesso ao crédito rural (Favareto *et al.*, 2019).

Todo o aporte de investimentos no Matopiba proporcionou expansão de áreas agrícolas e crescimento econômico. No entanto, o bioma em que a região está inserida é um dos mais ameaçados, sendo que 50% da sua vegetação nativa foi perdida (Favareto *et al.*, 2019). A expansão e modificação impulsionadas pela expansão agrícola no Matopiba evidenciam a preocupação em relação às mudanças climáticas, à perda da biodiversidade, às questões hídricas, aos impactos às populações tradicionais (Favareto *et al.*, 2019).

O Cerrado desempenha papel importante no setor agrícola brasileiro tanto na criação de animais quanto na lavoura Santana *et al.* (2020). Os investimentos em tecnologia da modernização agrícola tornaram possível o estabelecimento das atividades agrícolas no bioma e foram responsáveis por alterar a dinâmica do setor em diversas regiões do Cerrado. Por exemplo, o Cerrado do Triângulo Mineiro passou por um processo de reestruturação agrícola entre as décadas de 1970 e 1980, em que houve a modernização da produção, mudança nos produtos e maior adequação da produção a *commodities*. Em contrapartida,

essa mudança gerou desigualdades sociais por aumentar a especulação fundiária, reduzindo o acesso à terra e maior exploração da mão de obra trabalhista, com condições precárias de trabalho e salários baixos (Rocha, 2025).

No Cerrado mato-grossense, o desenvolvimento das atividades agrícolas possibilitou ao estado ser o maior produtor de grãos do Brasil e apresenta taxas altas de conversão da vegetação nativa em monocultivos que aumentam a pressão antrópica sobre esse bioma. Um dos impactos desse desenvolvimento agrícola é a evidência de um monopólio produtivo de grãos, como aponta Silva, Evangelista e Melo (2021). Além dos impactos ambientais gerados por essas atividades. A partir disso, é evidente a necessidade do estabelecimento de uma agricultura mais sustentável que reduza impactos e priorize a manutenção dos recursos naturais para gerações futuras.

No Decreto 8.447, de 6 de maio de 2015, o documento oficial da criação do Plano de Desenvolvimento Agropecuário do Matopiba (PDA-Matopiba) faz menção à sustentabilidade apenas ao estabelecer como meta o desenvolvimento econômico sustentável baseado na agricultura e pecuária da região. O desenvolvimento econômico sustentável é um conceito que envolve o crescimento econômico de forma a promover a redução de disparidades sociais, a melhoria na qualidade de vida da população e a preservação ambiental (Arraes, Diniz e Diniz, 2006). Além disso, o PDA-Matopiba é baseado em políticas de incentivo à infraestrutura e, a partir dessas políticas, houve uma ampliação de rodovias, ferrovias, portos, investimentos em tecnologia na recente fronteira agrícola do Cerrado (AATR, 2021).

No ano de 2023 o decreto 11.767 que trata sobre o Plano de Desenvolvimento Agropecuário e Agroindustrial do Matopiba e cria o seu Comitê Gestor, há a menção do Plano de Desenvolvimento Agropecuário e Agroindustrial do Matopiba de forma a promover políticas públicas para desenvolvimento econômico, ambiental e social sustentável baseados nas atividades agrícolas e em específico da promoção do desenvolvimento agropecuário com base na sustentabilidade agroambiental. Sustentabilidade agroambiental pode ser definida como sustentabilidade nas práticas agrícolas, buscando o equilíbrio entre os pilares econômicos, ambientais e sociais.

A criação de uma área com limites geograficamente definidos para expansão do agro-negócio pode ser entendida como um território criado e organizado por forças econômicas que objetivam desenvolver as atividades agropecuárias. Território que é recorte espacial de relações de poder, domínio e pertencimento por indivíduos numa escala micro e envolve o Estado e a sociedade civil numa escala macro (Moreira, 2011). Nesse sentido, a existência da fronteira agrícola denominada Matopiba é marcada a partir da sua institucionalização, embora a viabilização das atividades agropecuárias e os investimentos em políticas públicas

tenham iniciado na década de 1970, evidenciando o território como recorte tangível da efetivação das políticas públicas (Becker, 2011).

A questão da agrária no Brasil, mesmo após as reformas e iniciativas do Governo do Partido dos Trabalhadores, se manteve sob as mesmas problemáticas da exploração do trabalho, monocultura e latifúndio e foi considerada como uma série de medidas que resultou numa reforma agrária conservadora (Pereira, Origuéla e Coca, 2021).

No âmbito das relações de poder na escala macro e também no campo das disputas ideológicas, a institucionalização do Matopiba e o seu Plano de Desenvolvimento Agropecuário foram revogados no ano de 2020, período marcado por reformas impactantes que alteraram direitos sociais, a agenda da política regional, dispersão de ministérios, superintendências de desenvolvimento e bancos regionais (Monteiro Neto, Colombo e Neto, 2023). Apesar das discussões sobre a institucionalização e revogação dessa, as atividades agropecuárias já existiam antes do decreto de 2015 e mesmo após a sua revogação as atividades agropecuárias continuaram a ocorrer, as principais diferenças consistem na execução das políticas públicas (AATR, 2021).

No período de 2016 a 2022, o desmonte das políticas ambientais representou o avanço de uma crise ambiental e reforçou da exploração extrativista dos recursos naturais do Brasil. Órgãos públicos foram ameaçados de exercerem suas atividades após os cortes de orçamentos rigorosos, como o caso do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA), Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) resultando na flexibilização das políticas de desmatamento (Pereira, Origuéla e Coca (2021).

O potencial da nova fronteira agrícola em se tornar um polo de atividades agropecuárias sustentáveis pode contribuir na adesão de novos mercados e a entrada do Brasil em organizações internacionais de promoção a sustentabilidade e o cumprimento dos objetivos para agricultura sustentável dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, Fome Zero e entre outros. Para isso é notória a necessidade de uma postura mais rigorosa quanto às medidas que garantam a sustentabilidade na exploração dos recursos naturais para o Brasil obter mais notoriedade no mercado internacional e maior competitividade entre os seus principais concorrentes (Estados Unidos, União Europeia e China) (Thorstensen e Mota, 2022). Além de possibilitar a redução das desigualdades no campo, alcançar a segurança alimentar, melhorar a nutrição que podem contribuir também para as questões de bem estar social da população.

As atividades agrícolas ligadas ao agronegócio brasileiro são importantes para a economia do país. O Brasil é um dos principais produtores de agrocombustíveis, além

de ser um dos setores que mais recebem investimentos, resultando em um dos setores de maior relevância para a economia brasileira (Gomes, 2019). Além da produção para exportação, as atividades agrícolas brasileiras também têm sua produção voltada para o abastecimento do mercado interno. Previsões estimam que as regiões de países tropicais será responsável por garantir a segurança alimentar de aproximadamente mais 2,3 bilhões de pessoas até 2050 (Gomes *et al.*, 2017).

Os efeitos das mudanças climáticas reforçam a necessidade de se discutir medidas de mitigação das atividades agrícolas. O modelo do agronegócio é um dos que mais impacta o meio ambiente por ser uma atividade que presume a supressão da vegetação natural, quando associadas a práticas de manejo inadequadas e ao uso irrestrito de agrotóxicos podem resultar na degradação dos solos (Sambuichi *et al.*, 2014; Gomes, 2019). Além de ser um dos setores da economia que mais emitem gases do efeito estufa.

O Brasil tem se alinhado a organizações mundiais que visam a sustentabilidade, como Agenda 2030 das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável. A agenda das Nações Unidas para o Desenvolvimento é um compromisso entre diversos chefes de Estado que assumem o compromisso de erradicar a fome, reduzir desigualdades, proteger os direitos humanos, proteger os recursos naturais etc. (ONU, 2016). Para além da agenda das Organizações das Nações Unidas (ONU), há o compromisso entre a comercialização de produtos sustentáveis, que em 2015 foi reafirmado o esforço do comércio internacional para fomentar o crescimento sustentável e os Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 (Thorstensen e Mota, 2022).

O objetivo de acabar com a fome e promover a agricultura sustentável, a ODS 2, também está relacionado com a produção e o consumo de alimentos sustentáveis, ressalta-se as metas 2.1 que preconiza acabar com a fome, em particular das pessoas em situação de vulnerabilidade socioeconômica e garantir alimentos saudáveis em disponibilidade contínua; a meta 2.2 que preconiza acabar com a má nutrição, acabar com a desnutrição de crianças menores de cinco anos de idade, e atender as demandas nutricionais de meninas adolescentes, mulheres grávidas e lactantes e das pessoas idosas e por fim, a meta 2.3 com objetivo de garantir sistemas sustentáveis de produção de alimentos e implementar práticas agrícolas que aumentem a produtividade ao mesmo tempo que garanta a existência dos ecossistemas, fortaleça a capacidade de adaptação às mudanças climáticas e melhore a qualidade dos solos (IPEA, 2024).

O ODS 12 sobre o consumo e produção sustentável visa promover a mudança dos padrões de consumo e na produção de alimentos que possibilitem o desenvolvimento social e econômico sustentável (BRASIL, Ministério do Meio Ambiente, 2025). O ODS 13 sobre as ações contra as mudanças climáticas que apresenta metas para mitigar os impactos dessas

mudanças no clima, dentre elas está o fomento à práticas de educação e conscientização sobre a temática, a integração de políticas e planejamento para as mudanças climáticas, disponibilidade de subsídios financeiros, focar em grupos minoritários no planejamento de ações no combate a mudança do clima (IPEA, 2024). No Matopiba, nos estados do Maranhão e do Tocantins, existe o projeto *UNEP Generation Restoration: Catalyzing a nature-based transformation in Finance, Jobs, and Cities*, que estimula iniciativas de recuperação de ecossistemas a partir de parcerias governamentais, setor privado e organizações não-governamentais (IPEA, 2024).

Outro objetivo da ODS que Brasil se comprometeu é a ODS 15 de proteger, recuperar e fomentar o uso sustentável dos ecossistemas terrestres (IPEA, 2024). No Matopiba, nos estados do Maranhão e Tocantins há o projeto *UNDP BRA/19/005 Strengthened implementation of Brazil's National Strategy for Reducing emissions from deforestation and forest degradation in developing countries (ENREDD+)*, do português: "Implementação reforçada da Estratégia Nacional do Brasil para Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal em Países em Desenvolvimento", que apoia a implementação de pagamentos pelos resultados alcançados da redução das emissões por desmatamento e degradação florestal no bioma amazônico (IPEA, 2024).

O Brasil tem a meta de reduzir as emissões em 43% até 2030, baseado no ano de 2005; o cumprimento dessa meta dependerá do agronegócio (Secaf, 2016). Além dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, particularmente os objetivos associados à promoção de uma agricultura sustentável, o Brasil se comprometeu com o Acordo de Paris, um acordo internacional para a tomada de medidas de redução na emissão de gases do efeito estufa, combater o desmatamento e estabelecer limites para o aumento da temperatura global (Secaf, 2016).

Evidenciam-se os esforços do governo brasileiro no âmbito das políticas públicas e aspectos legais, quanto a preocupação com as questões ambientais e da sustentabilidade na agricultura, como a adoção do Programa de Agricultura de Baixo Carbono (Plano ABC) que visa a mitigação dos gases do efeito estufa advindos da agropecuária por meio da captação de crédito e investimento em tecnologias que reduzam as emissões (Wander, Tomaz e Pinto, 2016). O Programa Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (PRONAF) e todas as políticas de suporte à agricultura familiar, como o Programa de Aquisição de Alimentos (PAA), Seguro da Agricultura Familiar (SEAF), Programa Nacional de Crédito Fundiário (PNCR) e outros (Wesz-Junior, 2021).

A legislação ambiental que criou o novo código florestal, a Lei 12.651 de 25 de Maio de 2012, estabeleceu as normas para a proteção da vegetação nativa e das florestas a medida que promova o desenvolvimento econômico, ficaram definidas também as áreas

de preservação permanente, reserva legal, usos restritos, uso alternativo do solo, áreas consolidadas e áreas de remanescentes de vegetação nativa (Savian *et al.*, 2014). A proteção dos recursos naturais, o uso sustentável dos solos, água, em resumo, a melhor gestão dos recursos naturais são também por razões econômicas, pois a competitividade, a inovação e sustentabilidade estão associadas entre si (Miranda, Carvalho e Martinho, 2020).

O plano ABC de mitigação das emissões de carbono no Matopiba através do crédito e investimentos é uma política com grande potencial para a promoção da sustentabilidade nas atividades agrícolas, pois incentiva através do crédito a sustentabilidade sem afetar o desenvolvimento das atividades agropecuárias e minimiza o impacto dessas atividades, por meio do fomento de atividades de integração lavoura-pecuária-floresta, recuperação de áreas degradadas, tratamento de dejetos de animais entre outras ações (Suela, Nazareth e Cunha, 2020). No Matopiba, os setores que mais contribuíram nas emissões desses gases do efeito estufa foram a pecuária, refinaria de açúcar, fabricação de Bebidas e Fumo, Produção Florestal, Pesca e Aquicultura e produção de produtos têxteis no país, ainda assim, as atividades agropecuárias podem ser ferramenta de mitigação dos danos ambientais, principalmente por meio da redução das emissões de gases e a obtenção de ganhos econômicos, para isso o Plano ABC representa potencial de estabelecimento da sustentabilidade, no sentido de possivelmente condicionar o crédito rural aos estabelecimentos que assumirem uma produção de "baixo-carbono" (Suela, Nazareth e Cunha, 2020).

Apesar das iniciativas de práticas sustentáveis na agricultura, o Brasil ainda tem muitos obstáculos para alcançar as metas e objetivos estabelecidos nos acordos internacionais. Em relação aos compromissos com os ODS para uma agricultura sustentável, como contingências orçamentárias em programas governamentais, ameaça do retorno de políticas contrárias a segurança alimentar (IPEA, 2024). A Conferência do Clima (COP-21), um acordo jurídico entre países membros que o Brasil assumiu o compromisso de reduzir as emissões em até 37% até 2025 e até 43% até 2030, a contribuição foi considerada bastante otimista e terá grande dependência das práticas adotadas pelo agronegócio (Secaf, 2016).

Em relação ao comércio, o marco inicial da regulamentação entre meio ambiente e comércio ocorreu em 2001 e foi estabelecido pela Organização Mundial do Comércio durante as negociações da Declaração de Doha (Thorstensen e Mota, 2022). A organização para cooperação e desenvolvimento econômico (OCDE) que regulamentou as relações de comércio e meio ambiente desde a década de 1970, a organização define as diretrizes para melhorar as políticas públicas dos países membros e representa uma organização central na intermediação entre essas esferas, considera o conceito de crescimento verde, da promoção do desenvolvimento econômico a medida que também promova a proteção ambiental e o bem-estar da população (Thorstensen e Mota, 2022).

O Brasil precisa estar alinhado as exigências dos grandes mercados de importação para competir com outros mercados sustentáveis. O Brasil necessita garantir a implementação das políticas de meio ambiente, avançar nas questões relacionadas a regulação de carbono, aderir as normas de avaliação da OCDE, aperfeiçoar dados e informações acerca da sustentabilidade adotada, estreitar as relações entre os setores públicos e privados para viabilizar a aplicação dos VSS (Voluntary Sustainability Standards) que são certificações, selos ou normas que a produção agrícola está conformidade com critérios sociais, ambientais e econômicos sustentáveis (Thorstensen e Mota, 2022). Ainda de acordo com o autor, o Brasil se destaca em quantidade de VSS no setor agrícola em comparação com os Estados Unidos e a União Europeia.

Atualmente, o país estabeleceu a regulação da gestão e de processos internos que trata sobre a regulamentação no enquadramento de pessoas físicas e jurídicas no cadastro técnico federal de atividades potencialmente poluidoras e utilizadoras dos recursos ambientais, por meio da portaria nº 17 do Ministério do Meio Ambiente datada de 27 de janeiro de 2022 (Thorstensen e Mota, 2022). Além disso, a Secretaria de Comércio Exterior (Secex) pretende contribuir no monitoramento e na implementação da agenda ODS 30 e na elaboração de indicadores ambientais (Thorstensen e Mota, 2022).

O conselho sobre relatórios sobre o Estado do Meio Ambiente (Recommendation of the Council on Reporting on the State of the Environment – OECD/LEGAL/0170) criado ano de 1979, estabelece recomendação da realização constante de relatórios sobre o meio ambiente. O exposto evidencia a necessidade de estudos com análises estatísticas rigorosas, orientadas para a construção e aprimoramento de indicadores ambientais, uma diretriz reforçada pela necessidade de melhoria contínua das estatísticas e informações sobre o meio ambiente (Thorstensen e Mota, 2022).

Mesmo a região do Matopiba, que apresenta diversos danos ambientais com o avanço das atividades agropecuárias, apresenta grande potencial para o estabelecimento de uma agricultura mais sustentável. Com investimento financeiro, é possível recuperar aproximadamente um milhão de hectares de terras adequadas para atividades agrícolas de boa a regular dos solos do Matopiba; para isso, é necessária a adoção de políticas públicas e planejamento estratégico para o estabelecimento das práticas de manejo sustentável (Mendes *et al.*, 2024). O cenário atual aponta alguns obstáculos para o cumprimento dos acordos estabelecidos e para a implementação da sustentabilidade agroambiental. As dificuldades encontram-se na definição legal do que é a atividade agrícola sustentável, tanto para o país se inserir em novos mercados quanto para a construção de indicadores de sustentabilidade (Thorstensen e Mota, 2022). A construção de indicadores por meio da análise multicritério espacial permite avaliar a sustentabilidade agrícola em regiões de expansão agrícola.

## 5.2 Análise multicritério espacial baseada em lógica *fuzzy*

A adoção da análise multicritério espacial baseada em lógica *fuzzy* justifica-se diretamente pelos resultados apresentados nos capítulos anteriores. O Capítulo 2 evidenciou lacunas metodológicas para tratar da sustentabilidade agroambiental no Matopiba. Os capítulos 3 e 4 revelaram o abandono de terras agrícolas e a vulnerabilidade ambiental de algumas áreas protegidas, bem como processos territoriais de grande complexidade. Esta seção apresenta a metodologia utilizada para avaliar a sustentabilidade agroambiental.

A análise multicritério foi utilizada, por meio de métodos estatísticos, para formular uma estrutura para a resolução de problemas que envolvem múltiplos critérios, comumente conflitantes, com o objetivo de organizar e sintetizar informações acerca da sustentabilidade agroambiental do Matopiba, avaliando e hierarquizando um conjunto de alternativas, os cenários da sustentabilidade agroambiental.

### 5.2.1 Conceitos preliminares de lógica *fuzzy*

Na definição clássica dos conjuntos, chamados conjuntos *crisp*, um elemento sempre pertence inteiramente ou não pertence inteiramente a um certo conjunto. Neste caso, a função característica é dada por um valor 0 ou 1, da seguinte forma:

$$m_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \text{ pertence a } A, \\ 0, & \text{se } x \text{ não pertence a } A. \end{cases} \quad (5.1)$$

Por exemplo, considerando um conjunto  $A$  de “pessoas altas”, que medem 1,80 m ou mais e  $x$  a altura da pessoa, ou seja,

$$A = \{x : x > 1,80\}.$$

Neste caso, a interpretação será que apenas as pessoas que medem 1,80 m ou mais são altas, e as que medem abaixo de 1,80 m não são. Logo, considera-se apenas o pertencimento ou não-pertencimento ao conjunto. No entanto, este não é um conceito preciso e está, intrinsecamente, associado a uma incerteza. Por exemplo, uma pessoa que mede 1,79 m, de acordo com a definição acima, seria classificada como uma pessoa baixa, já que  $m_A(1,79) = 0$ . No entanto, é evidente que uma pessoa de 1,79 m está “mais próxima” de ser alta do que uma pessoa de 1,60 m, por exemplo. Com este exemplo, pode-se perceber que conjuntos clássicos não refletem a natureza de conceitos humanos, que tendem a ser abstratos e imprecisos.

A lógica *fuzzy* é comumente utilizada quando os limites entre os conjuntos não são claramente definidos. Neste caso, a separação desses conjuntos é caracterizada por meio

das funções de pertinência que podem assumir valores entre 0 e 1. Com isso, a transição de “pertencer a um conjunto” e “não pertencer a um conjunto” é gradual e essa transição suave é caracterizada por funções de pertinência *fuzzy* (Jang, Sun e Mizutani, 1997).

Outro aspecto dos conjuntos *fuzzy* é a possibilidade de interpretações linguísticas que, de acordo com Zadeh (1965), idealizador da lógica *fuzzy*, o conhecimento humano é imprescindível para identificação de padrões e interpretação. Neste sentido, a lógica *fuzzy* contribui na interpretação das incertezas e na imprecisão de pensamentos e conceitos abstratos (Jang, Sun e Mizutani, 1997). Essas imprecisões e incertezas são inerentes aos problemas de tomada de decisão e na quantificação dos critérios associados à sustentabilidade.

Na teoria de conjuntos *fuzzy* é necessário definir o universo de discurso das variáveis e determinar as funções de pertinência de cada variável. O universo do discurso pode ser entendido como o intervalo de todos valores possíveis que uma certa variável pode assumir. A definição das funções de pertinência é um processo subjetivo, pois depende da avaliação e julgamento individual (Jang, Sun e Mizutani, 1997). Mais precisamente, considerando o universo de discurso  $X$ , que é uma coleção de elementos  $x$ , um conjunto *fuzzy*  $A$  em  $X$  é definido como o conjunto de pares ordenados

$$A = \{(x, \mu_A(x)) : x \in X\} \quad (5.2)$$

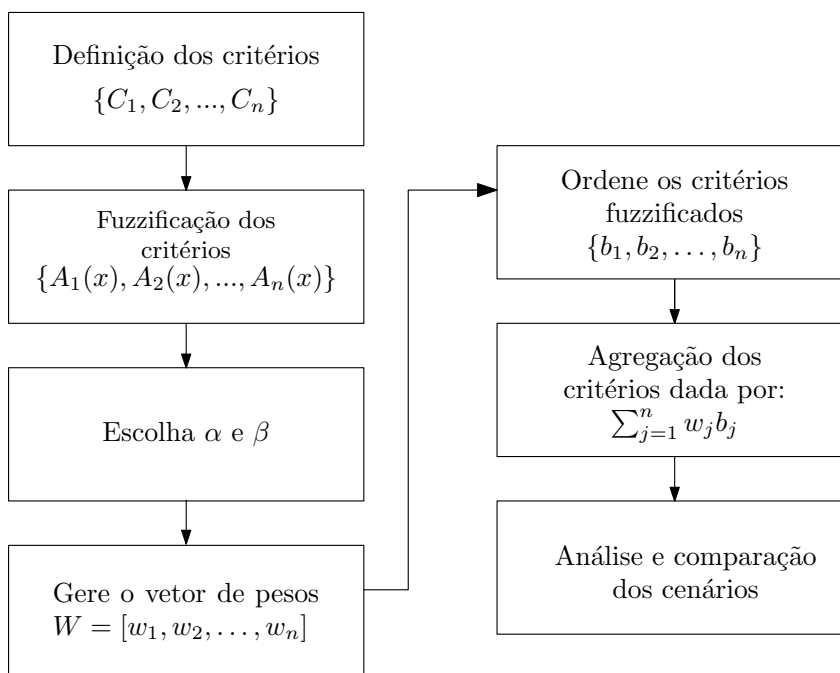
onde  $\mu_A(x)$  é chamado de função de pertinência para o conjunto *fuzzy*. A função de pertinência mapeia cada elemento de  $X$  a um grau de pertinência entre 0 e 1. É possível perceber que a definição de um conjunto *fuzzy* é uma extensão da definição de conjunto clássico. Se os valores de função de pertinência for restrito aos valores 0 ou 1, então  $A$  se reduz a um conjunto clássico e a função de pertinência  $\mu_A(x)$  se reduz à função característica.

### 5.2.2 Visão geral da AHP espacial *fuzzy* com S-OWA

A metodologia adotada considera a AHP espacial *fuzzy* com S-OWA. O S-OWA, acrônimo para *Slide-Ordered Weighted Aggregation*, é uma técnica utilizada para gerar os cenários de análise a partir da ordenação, ponderação e agregação dos critérios normalizados pelas funções de pertinência.

As etapas metodológicas deste trabalho são apresentadas na Figura 5.1 e foram adaptadas de Yager (1996). Inicialmente, é definido o conjunto de critérios  $\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$  que serão utilizados para avaliação das alternativas. Cada critério representa uma variável relacionada ao processo de tomada de decisão que, no caso deste estudo, os critérios estiveram associados à sustentabilidade agroambiental do Matopiba.

**Figura 5.1** – Etapas metodológicas da aplicação da MCDA *fuzzy* com o S-OWA.



**Fonte:** Dados da pesquisa.

Na segunda etapa ocorre a fuzzificação de cada critério. Essa etapa pode ser entendida como uma etapa de normalização dos critérios  $C_i$ . No entanto, ao invés de realizar uma simples normalização para que todos os critérios estejam em uma escala entre 0 e 1, aqui são utilizadas funções de pertinência  $A_i$  para fuzzificar cada um dos critérios  $C_i$ .  $A_i(x)$  corresponde ao valor da pertinência de um elemento  $x$  (valor de um *pixel*, por exemplo) do critério  $C_i$  ao conjunto *fuzzy* representado pela função  $A_i$ . Note que  $A_i(x)$  está necessariamente no intervalo entre 0 e 1. As funções de pertinência são definidas para cada critério de acordo com a representação e importância do critério para a sustentabilidade agroambiental.

Na terceira etapa ocorre a definição dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  a partir dos cenários que refletem as preferências dos decisores. Os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  definem, respectivamente, os níveis de otimismo e pessimismo do S-OWA. Esses índices são utilizados para gerar o vetor de ponderação, dado por  $W = [w_1, w_2, \dots, w_n]$  na quarta etapa. Os pesos seguem a condição  $w_i \in [0, 1]$  e  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ .

Na quinta etapa é realizada a ordenação dos critérios fuzzificados. Para cada *pixel*  $x$ , os critérios fuzzificados  $\{A_1(x), A_2(x), \dots, A_n(x)\}$  são ordenados decrescentemente, resultando no conjunto  $\{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ , onde  $b_j$  é o  $j$ -ésimo maior critério normalizado do *pixel*  $x$ . Com isso, necessariamente  $b_1 > b_2 > \dots > b_n$ .

Na sexta etapa ocorre a aplicação do operador OWA onde ocorre a agregação dos

critérios utilizando o operador

$$F(A_1(x), A_2(x), \dots, A_n(x)) = \sum_{j=1}^n w_j b_j,$$

que realiza a combinação dos critérios ordenados com os pesos correspondentes para produzir um único valor agregado. Por fim, realizam-se a análise e comparação das alternativas para escolha da melhor que irá atender às preferências dos tomadores de decisão. As alternativas são geradas de acordo com diferentes escolhas para os níveis de otimismo e pessimismo (parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ ). As etapas apresentadas são detalhadas a seguir.

### 5.2.3 Fuzzificação dos critérios

No contexto espacial, utilizando lógica *fuzzy*, a interpretação de uma região se dá de duas maneiras. No conceito de região *crisp*, os limites são nítidos e as propriedades dos objetos são homogêneas dentro de seus limites. No conceito de região *fuzzy*, os objetos ou atributos são expressos em grades que representam o grau de pertinência de cada célula a um certo conjunto *fuzzy* (Malczewski, 1999). As funções de pertinência utilizadas neste trabalho são apresentadas a seguir.

#### 5.2.3.1 Função de pertinência gaussiana

Esta função transforma a camada raster de entrada em um raster fuzzificado, atribuindo valores de pertinência a cada *pixel* entre 0 e 1. Quando o valor do *pixel* for zero, significa que não há associação ao conjunto nebuloso e quando o valor for próximo de 1, significa alta pertinência ao conjunto, sendo que a pertinência de 1 indica pertinência completa ao conjunto. A função de pertinência gaussiana pode ser definida por:

$$\mu(x) = e^{-f_1(x-f_2)^2} \quad (5.3)$$

onde  $x$  é cada *pixel* do raster de entrada,  $f_1$  a largura e  $f_2$  o ponto central da gaussiana. Quanto menor for o valor de  $f_1$ , menor será a abertura da função gaussiana.

Esta função costuma ser utilizada para quantificar variáveis linguísticas como “em torno de”. Por exemplo, uma função de pertinência gaussiana pode ser usada para representar a variável linguística de temperatura “em torno de 20°C”. Assim, o parâmetro  $f_2$  seria 20 e  $f_1$  seria escolhido de acordo com a incerteza associada a este valor central.

#### 5.2.3.2 Função de pertinência *large*

A função de pertinência grande transforma os *pixels* de um raster em um raster fuzzificado, com valores entre 0 e 1; quanto mais próximo de 1, maior a pertinência ao

conjunto, e quanto mais próximo de 0, menor a pertinência. A função *large membership* pode ser definida por:

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{f_2}\right)^{-f_1}} \quad (5.4)$$

onde  $f_1$  representa a largura da função e  $f_2$  o ponto médio da função de pertinência.

Esta função costuma ser utilizada para quantificar variáveis linguísticas como “acima de”. Por exemplo, uma função de pertinência grande pode ser usada para representar a variável linguística de temperatura “acima de 20°C”. Assim, o parâmetro  $f_2$  seria 20 e  $f_1$  seria escolhido de acordo com a incerteza associada a esse valor central.

### 5.2.3.3 Função de pertinência pequena

A função de pertinência pequena transforma os *pixels* de um *raster* em um *raster* fuzzificado, com valores entre 0 e 1; quanto mais próximo de 1 for, maior a pertinência ao conjunto; e quanto mais próximo de 0 for, menor a pertinência. A função *large membership* pode ser definida por:

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{f_2}\right)^{f_1}} \quad (5.5)$$

onde  $f_1$  representa a largura da função e  $f_2$  o ponto médio da função de pertinência.

Esta função costuma ser utilizada para quantificar variáveis linguísticas como “abaixo de”. Por exemplo, uma função de pertinência grande pode ser usada para representar a variável linguística de temperatura “abaixo de 20°C”. Assim, o parâmetro  $f_2$  seria 20 e  $f_1$  seria escolhido de acordo com a incerteza associada a esse valor central.

### 5.2.3.4 Função de pertinência linear

A função de pertinência linear implica a transformação linear de um arquivo *raster* para um *raster* fuzzificado com valores entre 0 e 1. Quanto mais próximo de 0 estiver, indica ausência de pertinência; quanto mais próximo de 1, indica pertinência total ao conjunto. A função linear é definida por:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a, \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b, \\ 1, & x \geq b \end{cases} \quad (5.6)$$

onde  $a$  é o limite inferior e  $b$  o limite superior.

Os valores abaixo do limite inferior são atribuídos a 0, indicando nenhuma pertinência, e os valores acima do limite superior são atribuídos a 1, significando completa

pertinência. Esta função de pertinência pode ser vista como uma simples normalização da variável quando  $a = \min(x)$  e  $b = \max(x)$ , resultando em

$$\mu(x) = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}. \quad (5.7)$$

#### 5.2.4 Agregação dos critérios *fuzzy* utilizando S-OWA

Na etapa da agregação de conjuntos *fuzzy* geralmente são utilizados três tipos básicos de operadores em tratamento de dados espaciais: operadores de intersecção de conjuntos *fuzzy*, operadores de união de conjuntos *fuzzy* e operadores que utilizam a média (Malczewski, 1999). A operação é a generalização das três funções básicas de operação, sendo que a ordenação dos pesos é decrescente, o que é um passo fundamental na etapa de agregação.

Os operadores OWA utilizam um vetor de ponderação  $W$  para atribuir pesos aos critérios, e esses pesos refletem as preferências dos tomadores de decisão quanto à importância de cada critério (Yager, 1996). Ainda de acordo com o autor, os critérios são ordenados decrescentemente em relação às preferências, e essa ordenação determina como os pesos são aplicados e, por fim, o operador que agrega os critérios usando os pesos resulta numa saída única que representa o cenário baseado nos critérios.

A média ponderada ordenada foi proposta por Yager (1996) e é composta por uma série de etapas que combinam critérios de acordo com alternativas que visam solucionar ou identificar a solução de um problema (Silva, 2020). Os pesos são ordenados em conformidade com as alternativas dos cenários; por exemplo, dado um vetor de pesos  $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ , o primeiro peso  $w_1$  representa o maior valor de um critério de uma dada alternativa, o peso  $w_2$  é o segundo maior valor de um critério dessa alternativa, e assim por diante, e o  $w_n$  representa o menor valor de um critério dessa alternativa (Malczewski, 1999).

A abordagem que utiliza um operador S-OWA generalizado permite ajustar os pesos para diferentes cenários que refletem as preferências dos decisores (Silva, 2020). Os pesos são aplicados aos critérios em ordem decrescente e agregados de acordo com:

$$w_i = \begin{cases} \frac{1}{n} (1 - (\alpha + \beta)) + \alpha, & i = 1 \\ \frac{1}{n} (1 - (\alpha + \beta)), & i = 2, \dots, n - 1 \\ \frac{1}{n} (1 - (\alpha + \beta)) + \beta, & i = n \end{cases} \quad (5.8)$$

onde  $\alpha \in [0, 1]$  é o nível de otimismo,  $\beta \in [0, 1]$  é o nível de pessimismo e  $\alpha + \beta \leq 1$ .

A etapa da agregação é uma etapa importante na sintetização da informação em problemas multicritérios, pois essa sumarização de informações facilita a toma de decisão

(Yager, 1996). Segundo Yager (1996), a agregação pode ser definida:

$$F(A_1(x), A_2(x), \dots, A_n(x)) = \sum_{j=1}^n w_j b_j \quad (5.9)$$

onde cada critério ordenado  $b_j$  de  $A_1(x), A_2(x), \dots, A_n(x)$ , é multiplicado pelo seu peso correspondente  $w_j$  e depois é realizada a soma desses produtos, resultando em um valor único que representa a alternativa baseada nos critérios  $F(x)$ .

Quando os critérios forem associados ao grau de sustentabilidade agroambiental, quanto mais próximo de 1, maior o grau de sustentabilidade indicado pelo critério; quanto mais próximo de 0, menor o grau de sustentabilidade indicado pelo critério. Após a etapa de agregação, foram realizadas a discussão e comparação dos cenários obtidos.

### 5.3 Padrões espaciais dos cenários da sustentabilidade agroambiental

Após a obtenção de cada cenário, foi calculado o Índice  $I$  de Moran para caracterizar os padrões espaciais, com base na média dos valores dos *pixels* de cada microrregião. O Índice de Moran é um método para medir a autocorrelação espacial em conjuntos de dados com informações geográficas, possibilitando a identificação de relações estatísticas entre unidades espaciais (Moran, 1950). Estatísticas de autocorrelação espacial, como os índices de Moran global e local, fornecem *insights* sobre fenômenos como *hotspots*, *coldspots* e *outliers* espaciais. Segundo (Anselin, 1995), a autocorrelação espacial global é utilizada para testar a hipótese nula de aleatoriedade de um fenômeno, bem como a possibilidade de agrupamentos nos dados, o que permite identificar padrões, ainda que não em suas localizações precisas. Em contraste, as estatísticas de associação espacial local permitem detectar agrupamentos espaciais e avaliar sua significância estatística (Anselin, 1995).

Na análise de associação espacial local, a matriz de pesos  $W$  atende a certos critérios: o número de observações deve ser igual, formando uma matriz quadrada, em que  $n$  corresponde ao número de unidades espaciais. Cada peso  $w_{ij}$  representa a influência da região  $i$  sobre a região  $j$ , sendo a diagonal principal igual a zero (Anselin, 1995).

Existem três abordagens principais para definir os pesos espaciais. Em abordagens baseadas em contiguidade,  $w_{ij} = 1$  quando duas unidades compartilham um limite e  $w_{ij} = 0$  caso contrário. Alternativamente, em abordagens baseadas em distância, atribui-se  $w_{ij} = 1$  se a região  $j$  estiver dentro de um raio especificado em relação à região  $i$ . Os pesos também podem ser padronizados pela soma das colunas, dada por  $S_0 = \sum_i \sum_j W_{ij}$  (Anselin, 1995).

O Índice de Moran Global é calculado da seguinte forma (Anselin, 1995):

$$I = \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} z_i z_j}{\sum_i z_i^2} \quad (5.10)$$

onde  $z$  representa o desvio padrão em relação à média. O Índice de Moran Local é calculado pela soma de cada observação, conforme expresso por (Anselin, 1995):

$$I_i = \frac{\sum_j w_{ij} z_i z_j}{\sum_i z_i^2} \quad (5.11)$$

Esse índice mede o valor de uma variável em relação à média ponderada de seus vizinhos. O  $I$  de Moran quantifica a autocorrelação espacial, cujo intervalo depende dos autovalores da matriz de pesos  $w_{ij}$  e apresenta valores próximos de 0 e 1, variando tipicamente entre -0,5 e 1,15 (Jong, Sprenger e Veen, 1984), de modo que valores acima do limiar esperado indicam autocorrelação espacial positiva, enquanto valores abaixo sugerem autocorrelação espacial negativa.

Adicionalmente, a significância estatística do Índice de Moran é avaliada por meio de um pseudo- $p$ -valor obtido por meio de permutações aleatórias (Anselin, 1995). Um nível de significância de  $p < 0.05$  indica alta significância estatística e sugere a presença de padrões espaciais, ao passo que  $p > 0.05$  indica baixa significância.

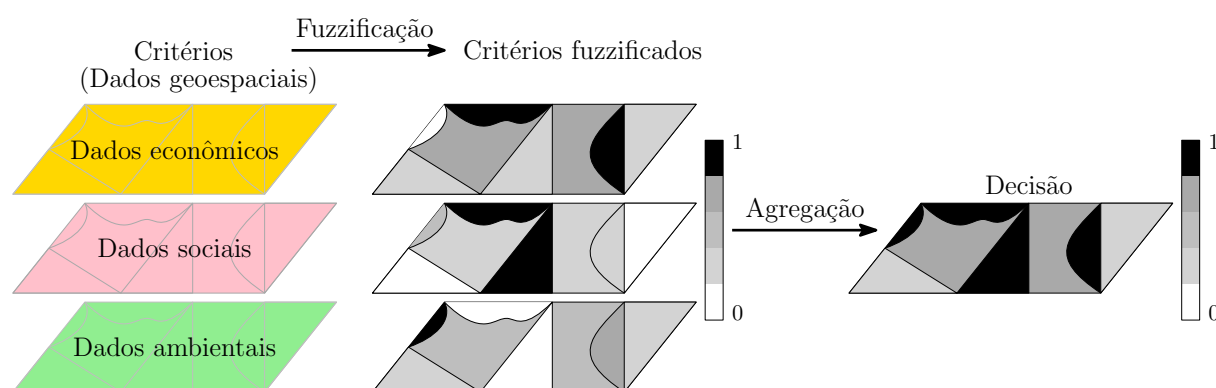
Neste estudo, a autocorrelação espacial foi calculada utilizando a média dos valores *pixels* em cada microrregião do Matopiba. Os pesos espaciais foram definidos com base na conectividade binária, em que  $w_{ij} = 1$  se as regiões  $i$  e  $j$  são contíguas e  $w_{ij} = 0$  caso contrário. O critério de contiguidade adotado foi o de “rainha” (*queen contiguity*), que considera regiões contíguas se compartilharem ao menos um ponto no espaço. O teste de significância estatística foi realizado com 999 permutações, adotando um limiar de  $p$ -valor de 0,05.

O Índice de Moran Local foi calculado com base em uma matriz de pesos espaciais definida por um critério de vizinhança com padronização por linha, garantindo que a soma dos pesos em cada linha fosse igual a 1. Os valores de entrada para os cálculos foram derivados da média dos valores dos *pixels* em cada microrregião. O nível de significância foi definido em 0,05, com  $p$ -valores ajustados para múltiplos testes utilizando a correção de Bonferroni. Os agrupamentos identificados (Alto-Alto, Baixo-Baixo, Alto-Baixo, Baixo-Alto) foram analisados comparando os valores da variável com a média global. Os agrupamentos Alto-Baixo e Baixo-Alto foram classificados como *outliers* espaciais, representando valores que divergiam significativamente das áreas vizinhas.

#### 5.4 Análise multicritério espacial *fuzzy* aplicada à sustentabilidade agroambiental no Matopiba

Nesta seção, são apresentados os aspectos metodológicos considerados para a análise multicritério da sustentabilidade agroambiental do Matopiba. Para a avaliação da sustentabilidade agroambiental no contexto do Matopiba, dados geográficos foram utilizados para avaliação, comparação e classificação dos municípios de acordo com os níveis de sustentabilidade, como mostrado na Figura 5.2. Para avaliar a sustentabilidade agroambiental do Matopiba, foi utilizada uma técnica de análise multicritério associada às ferramentas de geoprocessamento que possibilitem a elaboração de mapas sintéticos a partir da combinação apropriada de diversas variáveis de naturezas sociais, econômicas e ambientais (Silva, 2014).

**Figura 5.2** – Etapas metodológicas da aplicação da MCDA fuzzy com o S-OWA.



**Fonte:** Dados da pesquisa.

A seleção dos critérios reflete a disponibilidade de dados sobre sustentabilidade nas três dimensões (econômica, social e ambiental) e a incorporação de indicadores referentes às terras agrícolas abandonadas detalhados no Capítulo 3, agora integrada ao conjunto de critérios multicritério. De modo semelhante, a dimensão ambiental considerada no Capítulo 4 é aqui incorporada como uma etapa metodológica da AHP que, na avaliação integrada da sustentabilidade agroambiental do Matopiba, foi utilizada a análise multicritério espacial *fuzzy*.

##### 5.4.1 Seleção e descrição dos critérios adotados

Para a realização desta pesquisa, foram utilizados dados do Censo Agropecuário de 2017 e as informações de uso e ocupação de terras do (MapBiomass, 2021), imagens de satélite coletadas do *Google Earth Engine*, em resumo, as variáveis correspondem às

dimensões sociais, econômicas e ambientais do Matopiba. Os critérios selecionados para a caracterização da sustentabilidade agroambiental estão apresentados na Tabela 5.1.

**Quadro 5.1** – Descrição das variáveis selecionadas como critérios para caracterizar a sustentabilidade agroambiental.

Variável	Código IBGE	Descrição
Atividade-Lavoura Temporária (%)	V8	Percentual de estabelecimentos pertencentes ao Grupo de Atividade Econômica Produção de lavouras temporárias, em relação ao total de estabelecimentos agropecuários do município.
Atividade-Pecuária (%)	V10	Percentual de estabelecimentos pertencentes ao Grupo de Atividade Econômica Pecuária, em relação ao total de estabelecimentos agropecuários do município.
Atividade-Produção Florestal (%)	V13	Percentual de estabelecimentos pertencentes ao Grupo de Atividade Econômica Produção Florestal (florestas plantadas e florestas nativas), em relação ao total de estabelecimentos agropecuários do município.
Uso das terras-Lavoura (%)	V16	Percentual de área classificada como lavoura (temporária + permanente) no tema Utilização das Terras, em relação à área total dos estabelecimentos agropecuários do município.
Uso das terras-Pastagem (%)	V17	Percentual de área classificada como pastagem (natural + plantada) no tema Utilização das Terras, em relação à área total dos estabelecimentos agropecuários do município.
Cisterna (%)	V33	Percentual de estabelecimentos agropecuários com cisterna, em relação ao total de estabelecimentos no município.
Utilização de Agrotóxicos (%)	V34	Percentual de estabelecimentos agropecuários com declaração de uso de agrotóxicos em relação ao total de estabelecimentos agropecuários no município. A variável totaliza os que usaram agrotóxicos e os que não precisaram usar em 2016.
Despesa com Agrotóxicos (%)	V35	Participação da despesa com agrotóxicos na despesa total do estabelecimento agropecuário, por município.
Uso de irrigação (%)	V36	Percentual de estabelecimentos agropecuários com declaração de uso de irrigação em relação ao total de estabelecimentos agropecuários no município.
Assistência Técnica (%)	V37	Percentual de estabelecimentos agropecuários com declaração de assistência técnica em relação ao total de estabelecimentos agropecuários no município.
Agricultura familiar (%)	V38	Percentual de estabelecimentos agropecuários classificados como Agricultura Familiar em relação ao total de estabelecimentos agropecuários no município. A definição legal consta no Decreto nº 9.064/2017.
Produtor com escolaridade até Ensino Fundamental (%)	V39	Percentual de produtores cujo curso escolar frequentado mais elevado corresponde, no máximo, ao Ensino Fundamental (inclui alfabetização, EJA e antigo primário).
Presença de terras agrícolas abandonadas	-	Estimativa da densidade de Kernel (KDE) das terras agrícolas abandonadas identificadas no Capítulo 3.
NDVI	-	Mensura a densidade da biomassa das áreas verdes.
Índice Gini Terras	-	Estima a concentração fundiária (Santos <i>et al.</i> , 2023).
Vab agropecuária	-	Participação do valor adicionado Bruto do setor agropecuário.
Carbono no solo	-	Quantidade de carbono nos solos.
Áreas queimadas	-	Cicatrizes de queimadas.

**Fonte:** Dados da pesquisa.

Os critérios selecionados se relacionam com a sustentabilidade agroambiental nas dimensões ambientais, sociais e econômicas. Em relação às atividades econômicas, elas designam o uso e a ocupação do solo. Por exemplo, estabelecimentos agropecuários com maior participação em atividades ligadas à pecuária podem indicar maior área de pastagem. Se houver manejo inadequado, isso pode levar à degradação dos solos, à redução do carbono no solo e a um baixo NDVI, fatores que, por sua vez, podem estar relacionados a áreas de queimadas.

Em outra perspectiva, as áreas de lavoura temporária geralmente exigem maior uso de insumos agrícolas, como irrigação e agrotóxicos. No que se refere ao uso de insumos, o uso exacerbado de agrotóxicos pode estar associado à ausência de orientações da Assistência Técnica. A presença da agricultura familiar tende a apresentar um baixo Índice de Gini (indicando menor concentração fundiária) e menor dependência de insumos, como defensivos agrícolas. Os indicadores ambientais, como NDVI, carbono no solo e áreas queimadas, são resultados diretos das práticas de manejo e do uso da terra. Sendo assim, todos os critérios abordados pertencem às esferas temáticas da sustentabilidade agroambiental.

#### 5.4.2 Construção das funções de pertinência para os critérios adotados

As funções de pertinência definem o grau de pertencimento a um conjunto *fuzzy*, ao qual é atribuído um valor entre 0 e 1: quanto mais próximo de 1, mais pertencente; quanto mais próximo de 0, menos pertencente. As funções de pertinência podem assumir diferentes formas, como a gaussiana, a linear, a grande pertinência, a pequena pertinência, etc.

##### 5.4.2.1 Atividade-Lavoura Temporária (%)

A lavoura temporária é caracterizada por culturas de curta duração, em que há a retirada da planta do solo, sendo necessário um novo plantio para se obter uma nova colheita. A longo prazo, sem o manejo adequado, a lavoura temporária pode empobrecer o solo, favorecendo processos erosivos. Ao mesmo tempo que o solo sem a cobertura vegetal também está suscetível à erosão. Nesse sentido, no contexto da sustentabilidade agroambiental, a função de pertinência para a variável da lavoura temporária foi a função de pertinência gaussiana.

A função de pertinência utilizada é apresentada na Figura 5.3a. A escolha da função de pertinência está associada à noção de equilíbrio, segundo a qual a variável da lavoura temporária assume que a ausência completa ou a presença em grande número desse tipo de atividade econômica não seria um cenário ideal para a sustentabilidade agroambiental.

#### 5.4.2.2 Atividade-Pecuária (%)

A atividade pecuária pode gerar impactos diretos ao solo, como compactação, quando a atividade pecuária é de animais de grande porte, erosão e desmatamento. Na região do Matopiba, as atividades da pecuária compreendem animais de grande, médio e pequeno porte, bem como a criação de aves, bovinos, caprinos, etc. A função de pertinência gaussiana foi utilizada para fuzzificar o raster da variável Pecuária, considerando também o equilíbrio no contexto da sustentabilidade agroambiental.

A função de pertinência utilizada é apresentada na Figura 5.3b. O equilíbrio da atividade pecuária seria o cenário em que houvesse atividades pecuárias para garantir a renda, sem que essa atividade fosse predominante na região e causasse impactos ambientais.

#### 5.4.2.3 Atividade-Produção Florestal (%)

A produção florestal compreende as práticas de manutenção da floresta nativa, com o objetivo de preservação da biodiversidade, e as atividades de produção florestal, que incluem a silvicultura, que é a produção de cultivo florestal. Apesar da silvicultura ser considerada uma prática sustentável por alguns autores, a sustentabilidade agroambiental depende de diversos fatores, como as condições prévias de plantio, plano de manejo adequado, distâncias de bacias, declividade, entre outros fatores ambientais.

A função de pertinência utilizada está apresentada na Figura 5.3c. Para a fuzzificação da variável da produção florestal, foi adotada a função de pertinência gaussiana, considerando o equilíbrio da atividade na região.

#### 5.4.2.4 Uso das Terras - Lavoura (%)

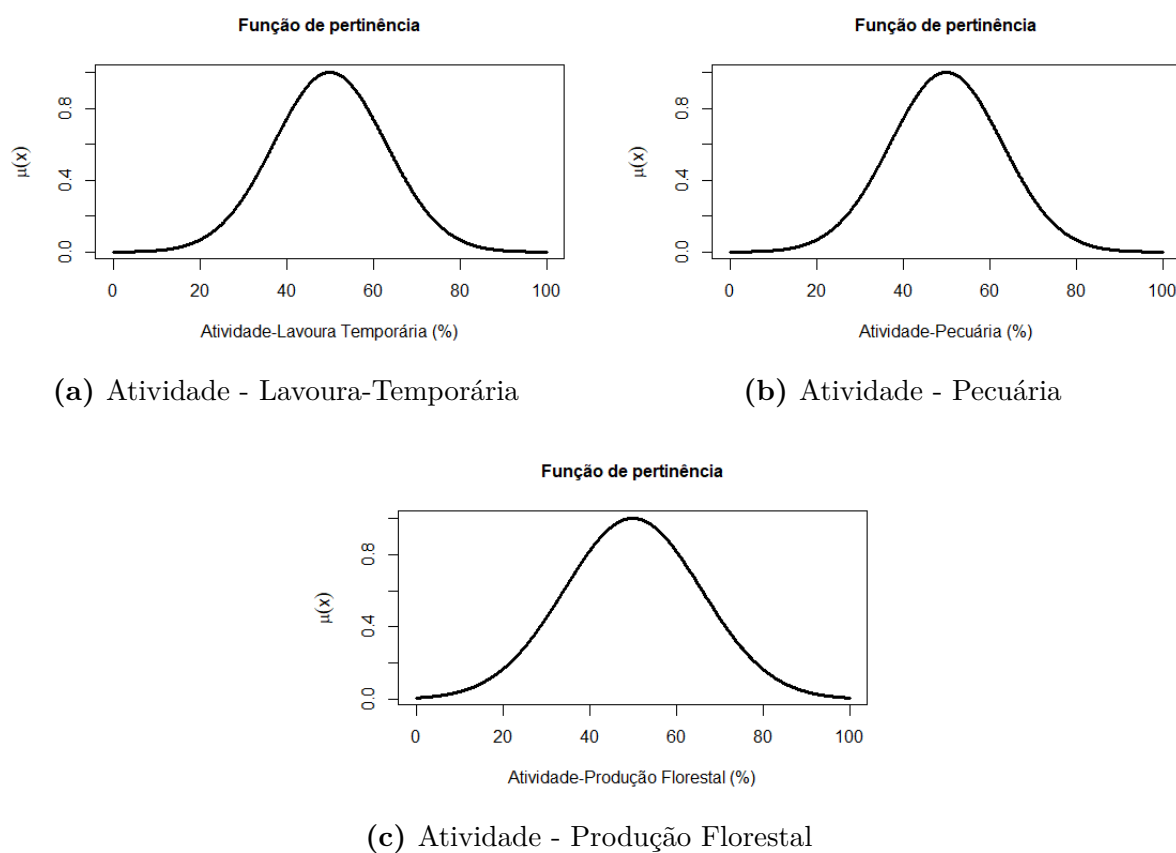
O uso de terras para lavoura é a variável que mensura a utilização das terras da região destinadas ao plantio de lavouras temporárias e permanentes. A função de pertinência gaussiana foi utilizada, considerando o cenário de equilíbrio entre a vegetação nativa e as atividades agrícolas.

A função de pertinência utilizada é apresentada na Figura 5.4a. O equilíbrio no sentido da sustentabilidade agroambiental, em que nenhuma área de lavoura seria boa e toda a área da região ocupada por lavoura também não é um cenário positivo.

#### 5.4.2.5 Uso das Terras - Pastagem (%)

A variável sobre o uso de terras para pastagem corresponde a dados de áreas com pastagem natural ou plantada destinadas a pastoreiros. Áreas para pastagens geralmente são ambientes que sofreram algum tipo de transformação, como retirada da vegetação,

**Figura 5.3** – Funções de pertinência dos critérios (a) Atividade - Lavoura-Temporária, (b) Atividade - Pecuária, (c) Atividade - Produção Florestal.

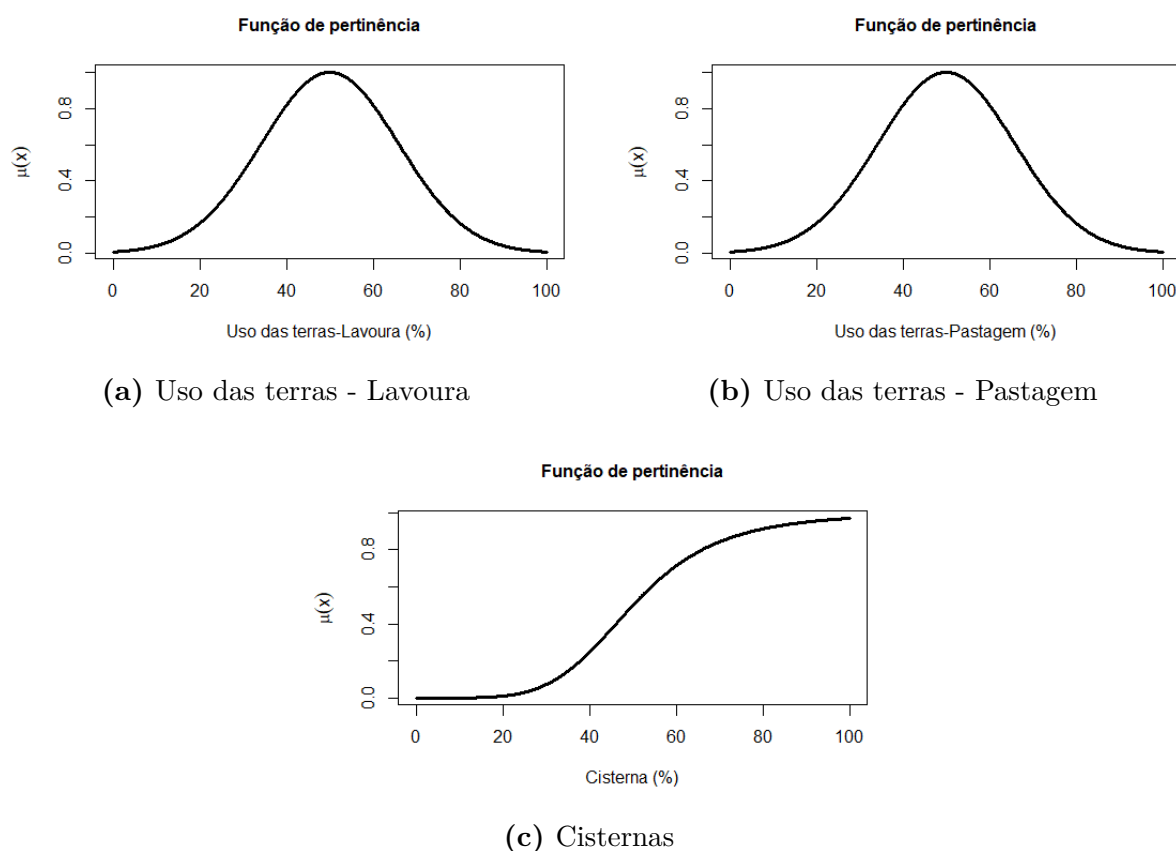


**Fonte:** Dados da pesquisa.

queimadas, que se ocorrem por meio de um manejo inadequado, podem gerar impactos negativos.

A função de pertinência utilizada é apresentada na Figura 5.4b. A função de pertinência gaussiana foi escolhida considerando o equilíbrio nas áreas de pastagem da região, que, para a sustentabilidade agroambiental, seria a presença de áreas de pastagem que não ocupem a totalidade do Matopiba.

**Figura 5.4** – Funções de pertinência dos critérios (a) Uso das terras - Lavoura, (b) Uso das terras - Pastagem, (c) Cisternas.



**Fonte:** Dados da pesquisa.

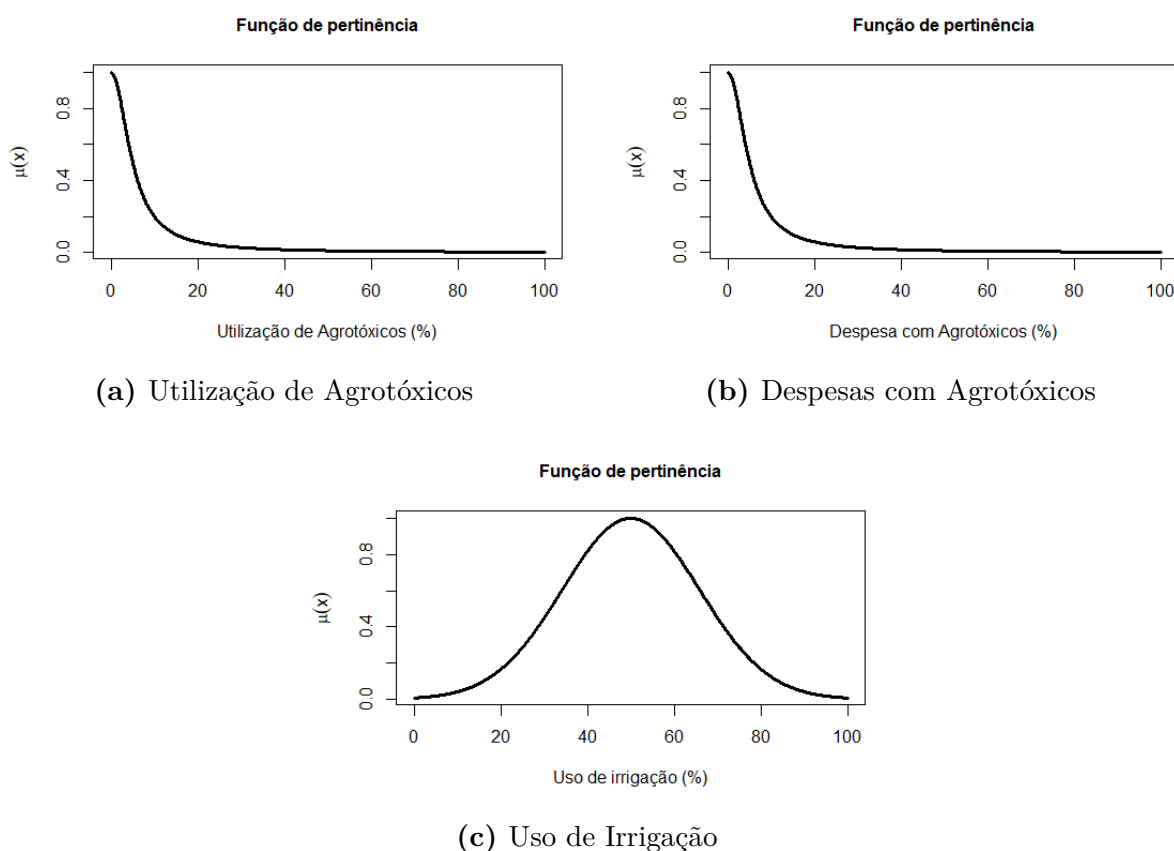
#### 5.4.2.6 Cisterna (%)

A cisterna é um reservatório de água que auxilia a população na manutenção de recursos hídricos para consumo próprio ou para irrigação em períodos de estiagem e seca. Para a fuzzificação dessa variável, foi escolhida a função de pertinência larga. A escolha dessa função considerou um cenário da agro-sustentabilidade com maiores quantidades de cisternas. A função de pertinência utilizada está apresentada na Figura 5.4c.

#### 5.4.2.7 Utilização de Agrotóxicos (%)

A utilização de agrotóxicos é a variável que abrange os estabelecimentos agrícolas que declararam o uso de agrotóxicos. A função escolhida para fuzzificar essa variável foi a função de pertinência pequena, no sentido da sustentabilidade agroambiental: quanto menor for o uso de agrotóxicos, maior será a sustentabilidade agroambiental, pois esse uso está relacionado a inúmeros impactos negativos, como a contaminação de solos e águas. A função de pertinência utilizada é apresentada na Figura 5.5a.

**Figura 5.5** – Funções de pertinência dos critérios (a) Utilização de Agrotóxicos, (b) Despesas com Agrotóxicos, (c) Uso de Irrigação.



**Fonte:** Dados da pesquisa.

#### 5.4.2.8 Despesa com Agrotóxicos (%)

A despesa com agrotóxicos segue a ideia de que quanto maior a utilização, maior será a despesa e menor será a sustentabilidade agroambiental. Desta forma, foi escolhida a função de pertinência pequena, pois o uso mínimo ou zero de agrotóxicos seria ideal para a sustentabilidade agroambiental. A função de pertinência utilizada está apresentada na Figura 5.5b.

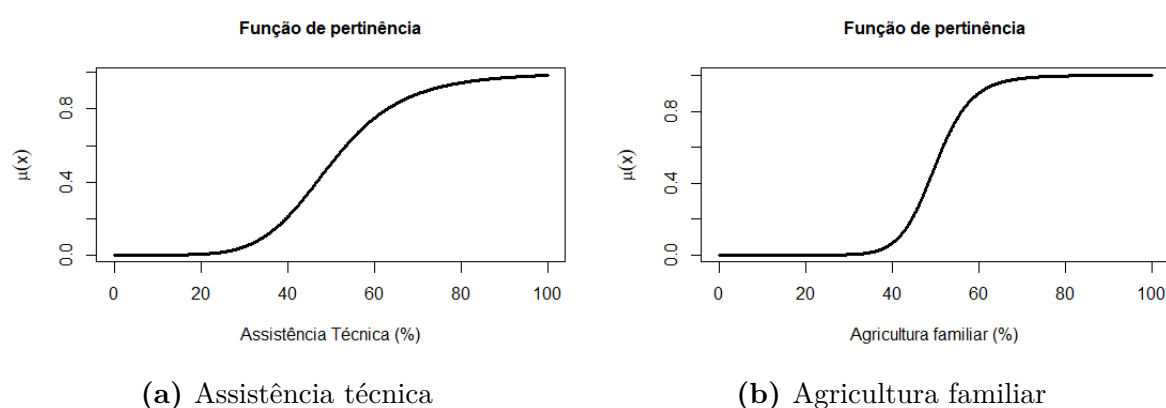
#### 5.4.2.9 Uso de Irrigação (%)

A variável sobre irrigação diz respeito aos estabelecimentos que utilizaram irrigação. A função de pertinência gaussiana foi escolhida para transformação do raster da variável, considerando o equilíbrio no uso de irrigação. A função de pertinência utilizada está apresentada na Figura 5.5c.

#### 5.4.2.10 Assistência Técnica (%)

A assistência técnica é um projeto do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) para a execução de projetos por meio da assistência técnica. A função de pertinência larga foi utilizada para fuzzificar essa variável, pois, considerando a sustentabilidade agroambiental, quanto maior o número de estabelecimentos com acesso à assistência técnica, melhor será a sustentabilidade agroambiental. A função de pertinência utilizada está apresentada na Figura 5.6a.

**Figura 5.6** – Funções de pertinência dos critérios (a) Assistência técnica, (b) Agricultura familiar



**Fonte:** Dados da pesquisa.

#### 5.4.2.11 Agricultura Familiar (%)

A agricultura familiar corresponde à categoria que foi institucionalizada por meio da Lei nº 11.326/2006, que definiu a agricultura familiar brasileira a partir de parâmetros sobre a delimitação de posse de terras, de até quatro módulos fiscais, renda predominantemente advinda das atividades vinculadas ao estabelecimento, mão de obra preferencialmente familiar e a direção desse estabelecimento ser de responsabilidade da família (Brasil, 2006b).

A função de pertinência utilizada está apresentada na Figura 5.6b. A função escolhida para essa variável foi a função de pertinência grande, pois no contexto da sustentabilidade agroambiental, quanto maior o número de estabelecimentos da agricultura familiar, maior será a sustentabilidade.

#### 5.4.2.12 Densidade de Terras Agrícolas Abandonadas

A densidade de terras agrícolas corresponde à variável que denota a concentração de terras abandonadas no Matopiba, obtida a partir do mapa de densidade Kernel. As

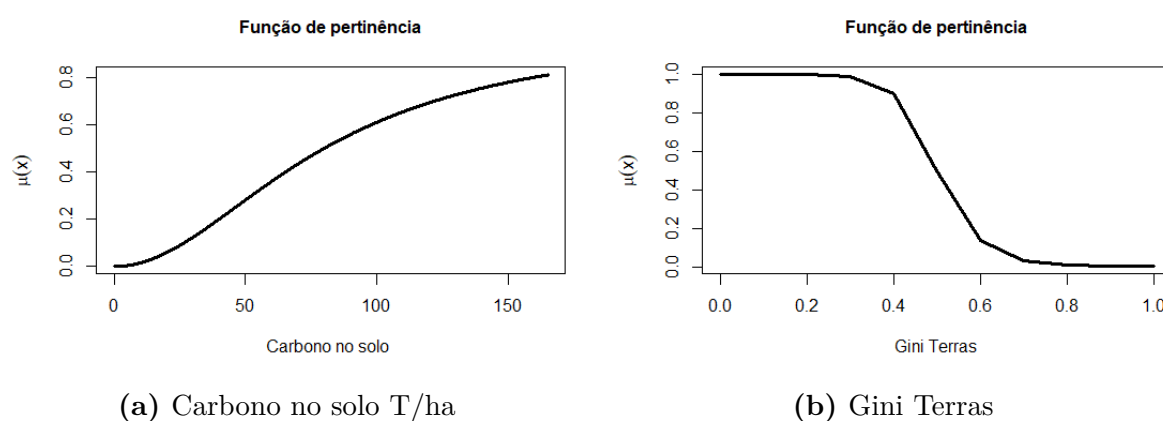
terras abandonadas são as áreas que anteriormente eram destinadas à agricultura, pecuária ou pastagem que entraram em desuso nos anos seguintes (ver Capítulo 3). Para fuzzificar essa variável, foi utilizada a função de pertinência linear, atribuindo-se 0 quando não há terras abandonadas e 1 quando há terras abandonadas no raster.

#### 5.4.2.13 Área Queimada Anual

As cicatrizes de queimadas consistem nos dados do MapBiomias Fogo, coleção 3, que denotam áreas queimadas durante os meses de 2017. O Mapbiomas realiza o mapeamento do fogo por meio da coleta de imagens Landsat 5, 7, 8 e 9 e da elaboração de um algoritmo de treinamento *Deep Neural Network* a partir de amostras de imagens de áreas queimadas e não queimadas em cada bioma brasileiro. Além disso, os autores realizaram procedimentos de validação dos resultados (MapBiomias, 2022). Os dados sobre as queimadas no Matopiba foram coletados no *toolkit* do Mapbiomas no *Google Earth Engine*, na escala 1000 x 1000 px, referentes ao ano de 2017.

A função de pertinência *crisp* foi utilizada para representar o pertencimento dos *pixels*, ou o conjunto pertence ou não pertence; em outras palavras, a representação no raster é 0 para áreas onde não houve queimada e 1 onde houve queimadas. Apesar da prática de queimar a vegetação ser comum nas atividades agrícolas do Cerrado, pode fomentar incêndios florestais e causar impactos ambientais, como influenciar a fertilidade dos solos, promover a poluição atmosférica, impactar negativamente a biodiversidade e os ecossistemas (Neves *et al.*, 2018).

**Figura 5.7** – Funções de pertinência dos critérios (a) Carbono no solo T/ha, (b) Gini Terras



**Fonte:** Dados da pesquisa.

#### 5.4.2.14 Índice de Gini da Concentração Fundiária

O índice de Gini é comumente utilizado para mensurar a concentração de renda. No entanto, este índice foi utilizado para medir a concentração de terras a partir dos dados de área e número de estabelecimentos do Matopiba, conforme proposto por Santos *et al.* (2023)). A função de pertinência pequena foi utilizada, a qual está mostrada na Figura 5.7b.

#### 5.4.2.15 Estoque de Carbono no Solo

Os solos são um dos subsistemas que armazenam carbono na forma orgânica e inorgânica através de processos como a humificação, agregação, sedimentação; no sentido oposto, a liberação desse carbono ocorre pelos processos erosivos, lixiviação, decomposição e volatilização (Rufino *et al.*, 2022). Os dados sobre estoque de carbono foram coletados da plataforma *toolkit* do Mapbiomas no *Google Earth Engine*, na escala de 1000 x 1000 *pixels* do ano de 2017. A coleção 2 do Mapbiomas solo corresponde ao estoque de carbono orgânico no solo em toneladas por hectare do ano 2017.

O método de obtenção dos mapas de estoque de carbono do Mapbiomas foi gerado a partir de imagens de satélite, coletas de dados em campo dos solos e do uso do algoritmo *Random Forest* para treinamento do modelo espaço-temporal (MapBiomas, 2023). A função de pertinência grande foi utilizada para essa variável (Figura 5.7a).

#### 5.4.2.16 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada é comumente utilizado para monitorar a cobertura e crescimento da vegetação, dado pela razão inversa entre a reflectância das bandas do infravermelho próximo e vermelho que contêm 90% da informação da vegetação (Li *et al.*, 2021), conforme a equação a seguir:

$$NDVI = (NIR - R)/(NIR + R). \quad (5.12)$$

O indicador assume valores entre -1 e 1; quanto mais próximo de valores positivos, indica maior densidade do dossel. Foram utilizadas imagens do Landsat 8 dos meses do ano de 2017 para obtenção do NDVI, definido por Rouse Jr *et al.* (1973). A função de pertinência utilizada para o NDVI foi a função de pertinência linear; o NDVI foi normalizado para uma representação entre 0 e 1.

#### 5.4.2.17 Valor Adicionado Bruto da Agropecuária

O valor adicionado bruto da agropecuária também pode ser chamado de VAB do setor primário, é um setor capaz de impulsionar outros setores da economia e demonstra

a participação das atividades econômicas no Produto Interno Bruto (PIB). A função de pertinência linear foi utilizada para fuzzificar a camada raster.

## 5.5 Resultados e discussão

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia de análise multicritério espacial *fuzzy*. Para avaliação da metodologia, foram considerados quatro cenários obtidos a partir de diferentes combinações de níveis de pessimismo e otimismo. A fim de estabelecer uma comparação entre os cenários, realizou-se uma normalização entre 0 e 1 de cada um dos cenários obtidos. Os cenários obtidos como resultado denotaram quatro possibilidades: o cenário do máximo otimismo, do máximo pessimismo, do cenário neutro e da média dos critérios. Além disso, para cada cenário foi realizada a análise de autocorrelação espacial entre as microrregiões do Matopiba.

### 5.5.1 Cenário de máximo otimismo

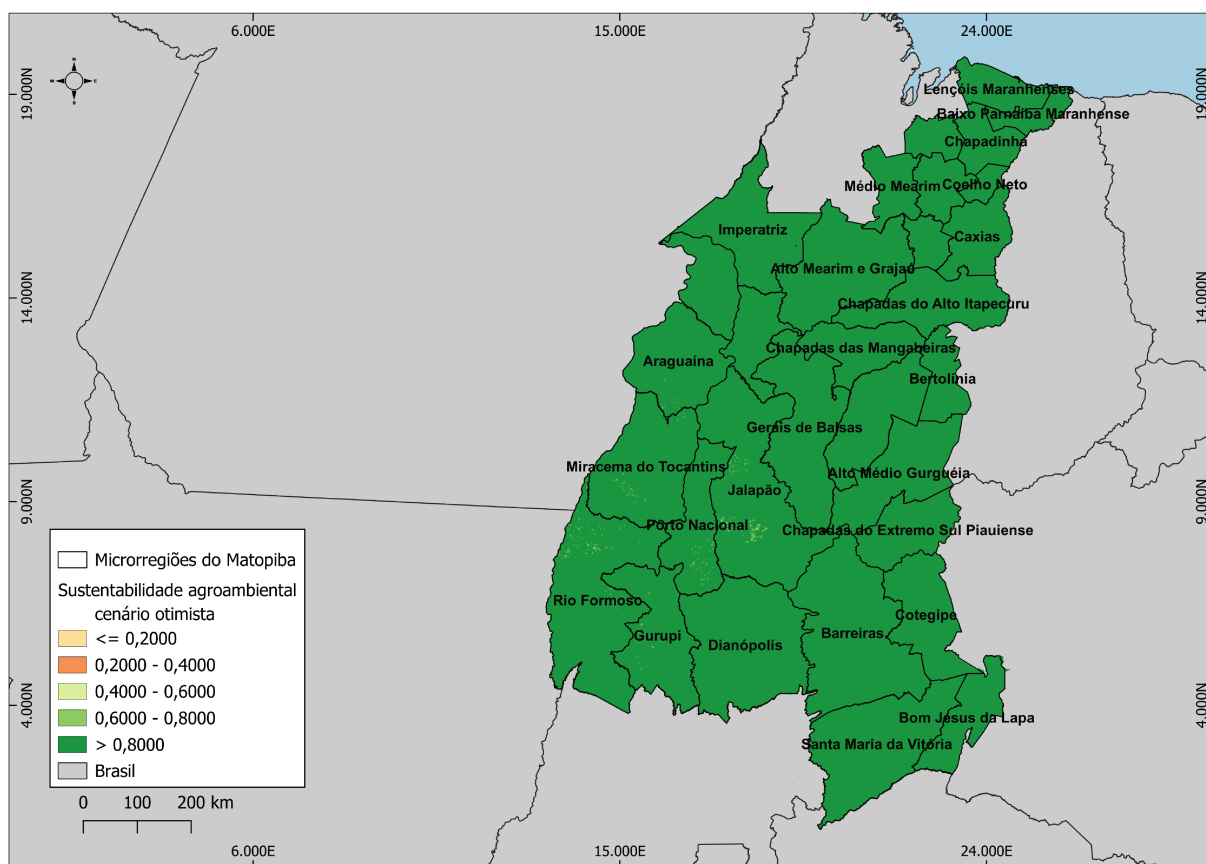
No cenário do máximo otimismo, para  $\alpha = 1$  e  $\beta = 0$ , tem-se que o único peso diferente de zero é o  $w_1 = 1$ . Isto reduz a função de agregação em (5.9) a um operador de agregação máximo, ou seja, o valor da sustentabilidade agroambiental de cada *pixel* será o maior valor entre todos critérios  $A_1(x), \dots, A_n(x)$ , correspondendo a

$$F(A_1(x), A_2(x), \dots, A_n(x)) = \max(A_1(x), A_2(x), \dots, A_n(x)).$$

O máximo otimismo foi definido pelos valores de  $\alpha$  e  $\beta$ . Para esse caso,  $\alpha$  é igual a 1 e  $\beta$  é igual a 0; no operador da soma ponderada, o valor de sustentabilidade será atribuído a cada *pixel* de forma que o maior valor dos critérios será atribuído a cada *pixel* no cenário otimista.

No cenário do máximo otimismo, os *pixels* mais próximos a 1 foram representados na cor verde e são os que apresentaram maior sustentabilidade agroambiental; os *pixels* mais próximos de 0, representados na cor laranja, são os que apresentaram menor sustentabilidade. No cenário otimista, foram poucas as áreas indicando menor sustentabilidade, localizadas mais a sudoeste do Matopiba, principalmente no estado do Tocantins, como exposto na Figura 5.8. Os resultados indicaram predominância de geocampos com alta sustentabilidade agroambiental. Mesmo considerando o melhor caso, algumas áreas no estado do Tocantins apresentaram baixa sustentabilidade agroambiental, esse fenômeno indica mesmo em condições favoráveis para sustentabilidade, persistem áreas com baixa sustentabilidade.

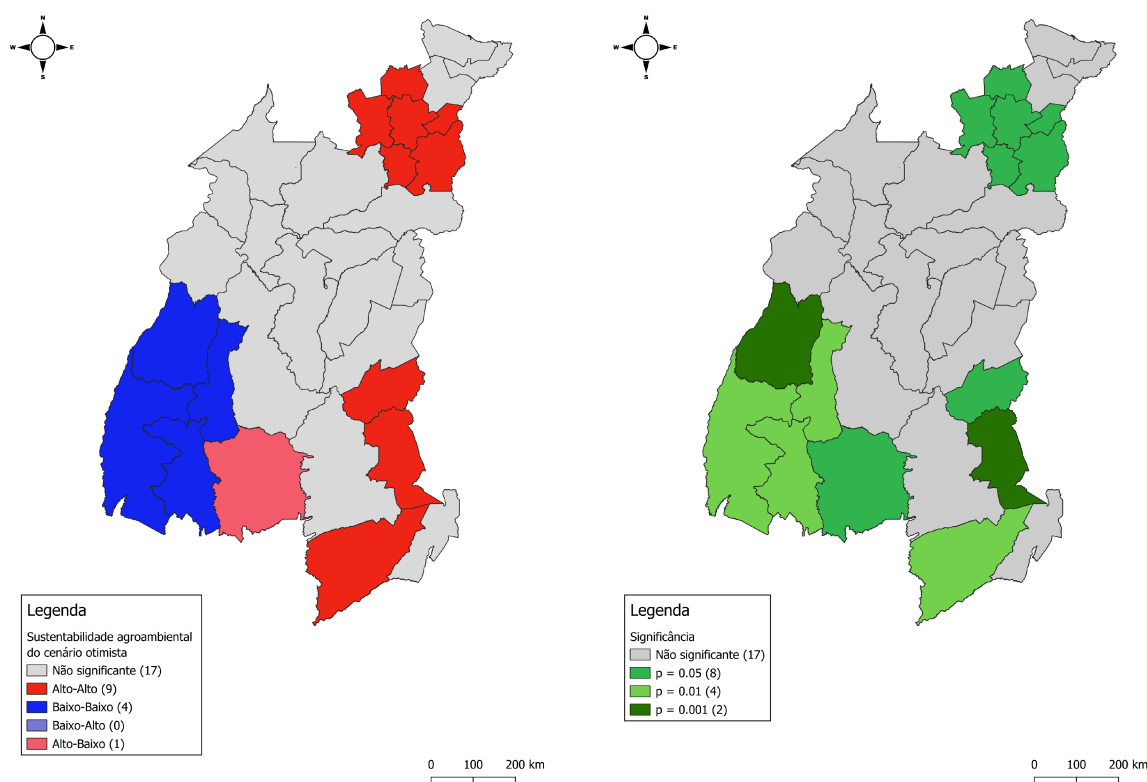
**Figura 5.8** – Cenário de máximo otimismo.



**Fonte:** Dados da pesquisa.

A literatura aponta que o Tocantins apresenta áreas de intensa pressão antrópica ligadas ao arco do desmatamento e à expansão da pecuária, que geralmente requer a derrubada da vegetação para formação de pastagens Ribeiro e Nahum (2023). Além disso, no ano de 2017 houve queimadas que atingiram a maior parte do Parque Nacional do Araguaia, na porção onde foram observados os geocampos com menor sustentabilidade agroambiental, apesar da prática da queimada ser considerada como ferramenta de manutenção das expressões vegetais do bioma Cerrado, esse fenômeno tem ocorrido frequentemente com o objetivo de transformar áreas em agricultáveis ou para pecuária (Hataishi, Rodrigues e Tartari, 2019). Essa localidade tem sido marcada pela proximidade com o arco do desmatamento e por práticas agrícolas ligadas ao agronegócio e a atividades econômicas da pecuária, à criação de animais for de grande porte que geralmente necessitam da derrubada da vegetação para criação de pastos, de acordo com Ribeiro e Nahum (2023).

**Figura 5.9** – Análise de autocorrelação espacial do cenário otimista da sustentabilidade agroambiental no Matopiba.



(a) Grupos do cenário otimista

(b) Significância do máximo otimismo

**Fonte:** Dados da pesquisa.

A autocorrelação espacial adotou pesos espaciais a partir do critério de contiguidade de rainha, considerando a proximidade entre as microrregiões, considerando o cenário do máximo otimismo. O resultado denotou diferentes grupos de microrregiões: o “Alto-Alto” com nove microrregiões (Santa Maria da Vitória, Cotegipe, Chapadas do Extremo Sul Piauiense, Caxias, Presidente Dutra, Médio Mearim, Codó, Coelho Neto, Itapecuru Mirim). O Grupo “Alto-Baixo” é composto apenas por Dianópolis e o grupo Baixo-Baixo com quatro microrregiões do Tocantins (Miracema do Tocantins, Porto Nacional, Rio Formoso, Gurupi), exposto na Figura 5.9a. E por fim, outras 17 microrregiões com baixa significância em relação à autocorrelação espacial (Figura 5.9b). O indicador de Moran Global apontou significância positiva de autocorrelação espacial com valor de 0,43 para a significância de  $p < 0,01$ . Ainda em relação à significância estatística, 14 microrregiões do Matopiba apresentaram significância em relação ao cenário do máximo otimismo. Duas microrregiões com alta significância  $p < 0,001$ , quatro com  $p < 0,01$  e oito com  $p < 0,05$ .

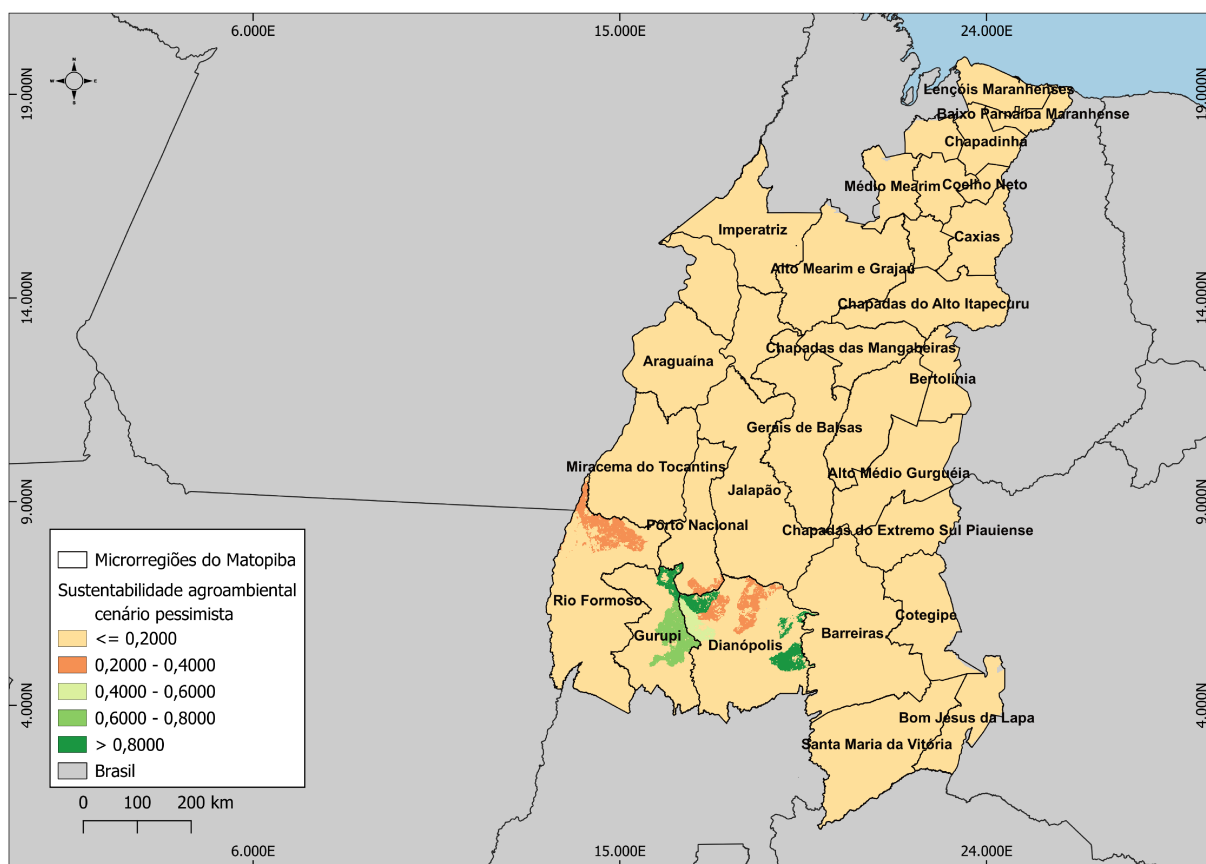
Os padrões espaciais do cenário do máximo otimismo demonstraram que há um padrão não-aleatório na organização espacial. Os grupos de microrregiões com altos

valores (Grupo “Alto-Alto”) representam indicadores acima da média e o Baixo-Baixo, valores abaixo da média. A microrregião Dianópolis representa um *outlier* na autocorrelação espacial, pois, apesar de apresentar alguns geomcampos da alta sustentabilidade, está localizada próxima ao grupo com baixos valores de sustentabilidade. Destaca-se o grupo "Baixo-Baixo" que, mesmo considerando um cenário positivo para sustentabilidade agroambiental, apresentou geomcampos com sustentabilidade menor em comparação ao total daquela cenário. No que se trata do uso e ocupação dos solos os geomcampos de menor sustentabilidade, correspondiam a áreas de atividades da agropecuária, arroz, soja, pastagem e áreas não vegetadas, campo alagado, formação campestre e formação savânica. As classes de uso e ocupação encontradas nas áreas com menores sustentabilidades têm relação com a agropecuária do Matopiba e com aspectos ambientais. O fato de as classes de formação florestal e não florestal aparecerem com sustentabilidade menor pode estar associado à densidade do dossel ou a cicatrizes de queimadas.

#### 5.5.2 Cenário de máximo pessimismo

Os resultados indicaram predominância dos geomcampos (*pixels*) com baixa sustentabilidade agroambiental (tons alaranjados); para esse cenário, o índice assume o valor do menor critério em cada *pixel*. Os geomcampos com maior sustentabilidade estavam localizados nas microrregiões de Gurupi e Dianópolis, no Tocantins, como exposto na Figura 5.10. Foram identificados geomcampos com a maior sustentabilidade agroambiental no noroeste da microrregião de Gurupi, em específico, no município de Brejinho de Nazaré, Tocantins. Os resultados do cenário de máximo pessimismo indicam uma situação de pior caso, sob a ótica da sustentabilidade agroambiental, a partir das variáveis utilizadas no modelo.

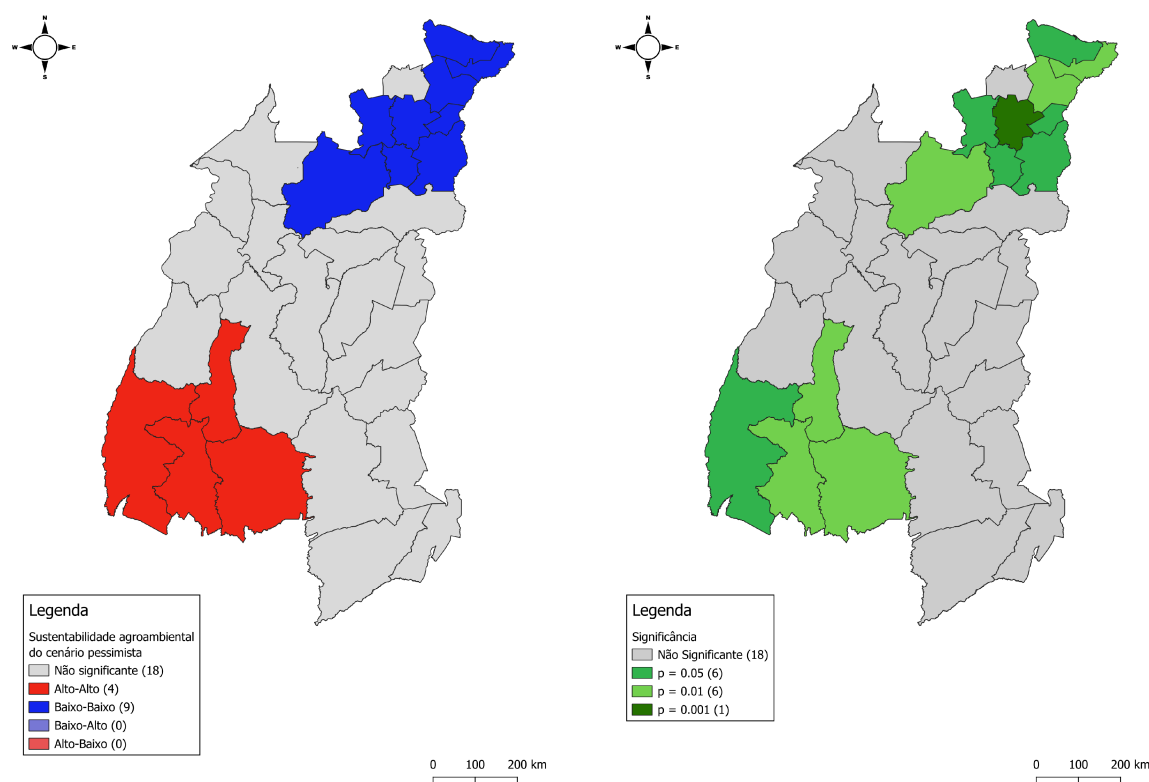
**Figura 5.10** – Cenário de máximo pessimismo.



**Fonte:** Dados da Pesquisa.

O máximo pessimismo considera o pior caso para a sustentabilidade agroambiental. Ainda assim, algumas áreas permaneceram com alta sustentabilidade maior que 0,8. Essas geocampos com alta sustentabilidade apresentaram formações savânicas e formações campestres, fitofisionomias típicas do Cerrado. Destaca-se a densidade de geocampos associados a essas formações, que podem ter contribuído para o resultado de alta sustentabilidade. Destacaram-se algumas áreas onde houve a concentração de geocampos de sustentabilidade alta, a presença de um relevo suave ondulado, ondulado a forte-ondulado, segundo a categoria da EMBRAPA (1979), e das áreas com afloramentos rochosos, que podem dificultar o avanço e estabelecimento das atividades agropecuárias.

**Figura 5.11** – Análise de autocorrelação espacial do cenário pessimista da sustentabilidade agroambiental no Matopiba.



(a) Grupos do cenário pessimista.

(b) Significância do máximo pessimismo.

**Fonte:** Dados da Pesquisa.

O Moran global apresentou autocorrelação espacial positiva, com  $I = 0,393$ . A autocorrelação espacial do cenário do máximo pessimismo denotou dois grupos de microrregiões, o “Alto-Alto” com quatro integrantes do estado do Tocantins: Porto Nacional, Gurupi, Dianópolis e Rio Formoso. E o outro grupo, o “Baixo-Baixo”, com nove microrregiões no Maranhão: Lençóis Maranhenses, Baixo Parnaíba Maranhense, Chapadinha, Médio Mearim, Codó, Coelho Neto, Caxias, Presidente Dutra e Alto Mearim e Grajaú. As demais microrregiões não apresentaram significância estatística no cenário pessimista. Em relação à significância estatística destacou-se uma microrregião, Codó-MA, com alta significância  $p < 0,001$ , seis com  $p < 0,01$  e seis com  $p < 0,05$ . O grupo "Alto-Alto", com microrregiões do Tocantins, apresentou valores acima da média, o que denotou melhor sustentabilidade agroambiental em comparação às demais microrregiões no cenário de pior caso. O grupo "Baixo-Baixo" com microrregiões do Maranhão apresentou valores abaixo da média, representando microrregiões com mais baixa sustentabilidade agroambiental.

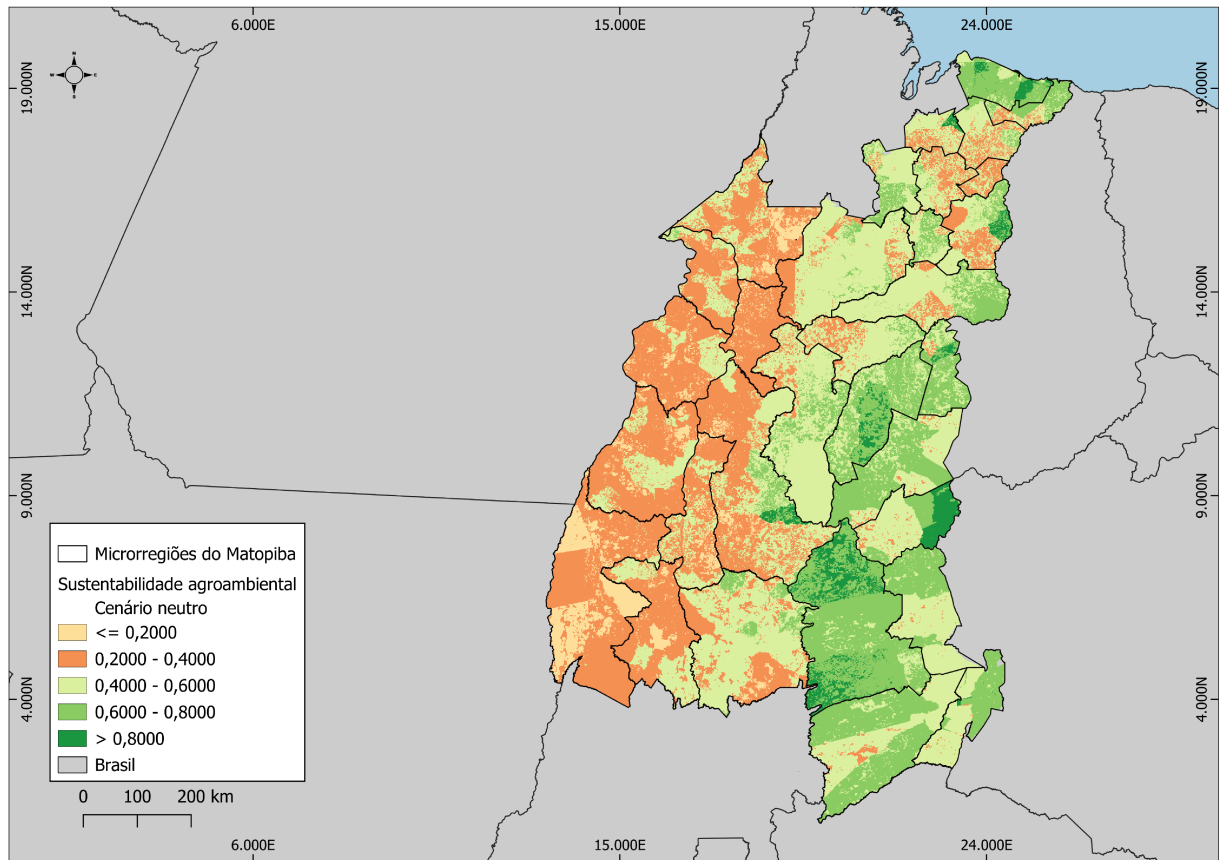
### 5.5.3 Cenário neutro

No cenário neutro, assume-se o valor de zero para  $\alpha$  e  $\beta$ , o que significa dizer que não se assume nenhuma preferência; assim, obtém-se a média dos critérios. No panorama geral observou-se *pixels* mais próximos a 1 na porção norte e ao leste da região, portanto entende-se a localidade desses geocampos com maior sustentabilidade agroambiental para esse cenário. Os *pixels* mais próximos a zero foram observados na porção oeste da região; esses representam menor sustentabilidade agroambiental e podem ser observados na Figura 5.12. Esse cenário representa a perspectiva mais próxima da realidade da sustentabilidade agroambiental em 2017.

Os geocampos com menor sustentabilidade agroambiental estavam localizados nas microrregiões do Tocantins, que eram áreas de uso e ocupação de campos alagados, formação savânica, formação florestal, formação campestre, áreas de soja, arroz, pastagem, entre outros. No Maranhão, os geocampos com menor sustentabilidade foram áreas de formação florestal, de formação savânica, de pastagem, de soja etc. No Piauí, as áreas de menor sustentabilidade foram de formação florestal; na Bahia, corresponderam a pastagem, formação florestal etc. As áreas que apresentaram menor sustentabilidade coincidem com as de maior densidade de terras agrícolas abandonadas.

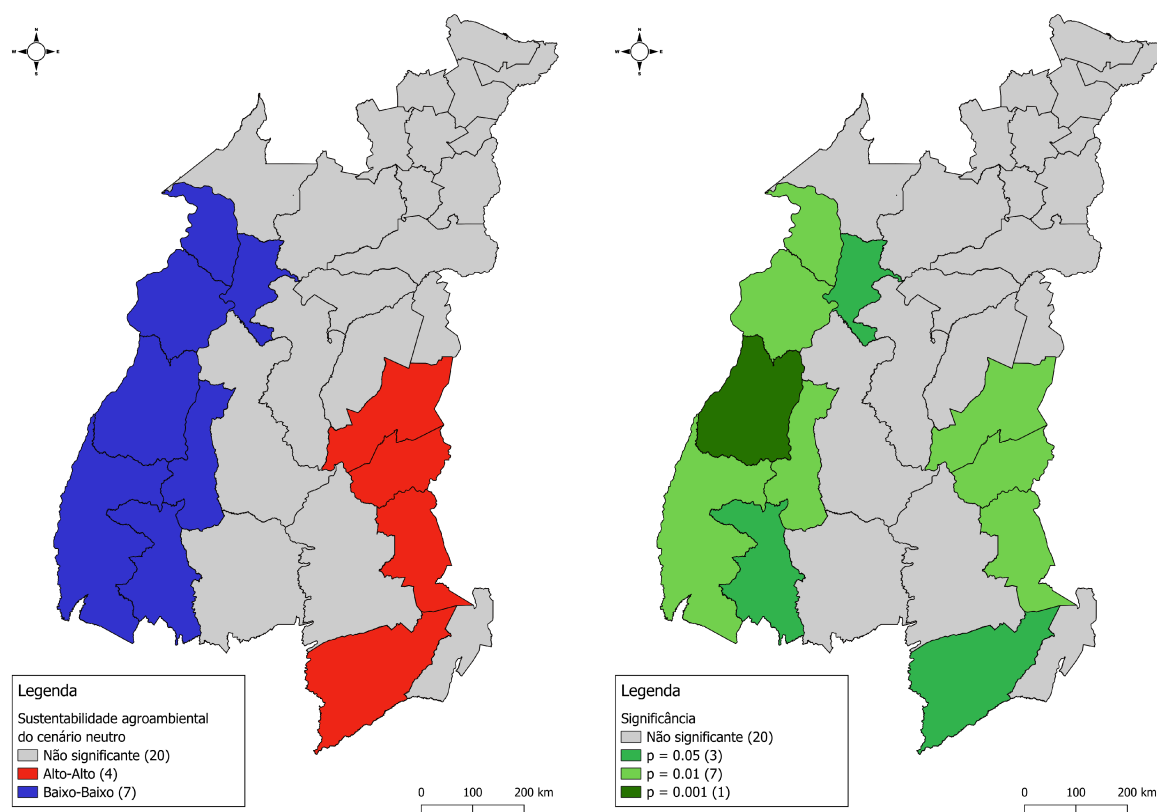
No cenário neutro, a sustentabilidade agroambiental nas microrregiões do Tocantins e do Maranhão revelou uma heterogeneidade espacial marcante, com os menores indicadores de sustentabilidade agroambiental. Essas áreas se caracterizam por geocampos que integram tanto fitofisionomias nativas, como formações savânicas, florestais e áreas pantanosas, quanto zonas de expansão antrópica (pastagens e cultivos de soja e arroz), o que denota uma convergência crítica entre o baixo desempenho da sustentabilidade agrícola e a alta densidade de terras agrícolas abandonadas. Tal relação sugere que o declínio da integridade ecológica nessas localidades não decorre apenas das características biofísicas, mas também de um ciclo de ocupação e abandono do solo, que compromete a resiliência dos ecossistemas locais perante os critérios de sustentabilidade adotados.

Figura 5.12 – Cenário neutro.



Fonte: Dados da Pesquisa

**Figura 5.13** – Análise de autocorrelação espacial do cenário neutro da sustentabilidade agroambiental no Matopiba.



(a) Grupos do cenário neutro.

(b) Significância do cenário neutro.

**Fonte:** Dados da Pesquisa

O  $I = 0,394$  indicou uma autocorrelação espacial positiva de agregação entre as microrregiões. Em Miracema do Tocantins, Rio Formoso e Porto Nacional foram observados os grupos "Baixo-Baixo" e "Alto-Alto", com Santa Maria da Vitória - BA, Cotegipe - BA, Chapadas do Extremo Sul Piauiense - PI e Alto Médio Gurguéia - PI. As demais 24 microrregiões do Matopiba não apresentaram significância estatística no cenário da média dos critérios. Em relação a significância, sete microrregiões se destacaram, uma com alta significância  $p < 0,001$ , quatro com  $p < 0,01$  e duas com  $p < 0,05$ .

Cada cenário demonstra situações diferentes que foram determinadas a partir da ponderação do  $\alpha$  e  $\beta$  de cada cenário, ou seja, em cada um dos cenários o peso de cada critério será de acordo com a importância em um determinado *pixel*. No cenário neutro, dois grupos estavam em evidência: o "Alto-Alto", com microrregiões da Bahia e do Piauí com valores acima da média, que se contrapõe ao grupo "Baixo-Baixo", com valores abaixo da média, que, em relação à sustentabilidade agroambiental, representa um grupo com valores mais altos de sustentabilidade ("Alto-Alto") e mais baixos de sustentabilidade ("Baixo-Baixo").

O grupo Alto-Alto caracteriza-se por uma forte predominância de vegetação nativa, liderada pela Formação Savânica, que abrange uma vasta extensão de aproximadamente 6,85 milhões de hectares. Logo em seguida, destacam-se a Formação Campestre, com 1,3 milhão de hectares, e a Pastagem, que ocupa cerca de 787 mil hectares. Este grupo também apresenta uma diversidade significativa de usos produtivos e naturais em escalas menores, como a Formação Florestal (414 mil ha), o cultivo de soja (519 mil ha) e o Mosaico de Usos (502 mil ha). Áreas menores são destinadas a culturas específicas, como algodão, arroz e café, e a áreas urbanizadas.

Já o grupo Baixo-Baixo apresenta números expressivos em termos de ocupação produtiva e de áreas alagadas e de alta umidade. Embora a Formação Savânica também seja a categoria líder (6,54 milhões de hectares), a área de Pastagem é massiva, com 5,91 milhões de hectares, valor quase oito vezes superior ao registrado no grupo Alto-Alto. Outro ponto de grande relevância é a presença de Formações Florestais (2,96 milhões ha) e de Campos Alagados e Áreas Pantanosas (1,59 milhão ha), o que indica um perfil de terreno com forte influência hídrica.

Ao comparar ambos, percebe-se que o grupo Baixo-Baixo concentra a maior parte da atividade pecuária e das zonas de conservação florestal e pantaneira. Por outro lado, o grupo Alto-Alto, embora possua uma base savânica similar, demonstra uma escala menor de pastagens e uma distribuição diferente de lavouras temporárias e permanentes. Categorias como Mineração e Afloramento Rochoso apresentam as menores participações territoriais em ambos os cenários, mas o grupo Baixo-Baixo chega a registrar apenas 77 hectares para atividades minerárias, o menor valor de toda a tabela. Além disso, o abandono de terras agrícolas apresentou concentração na região do Tocantins, enquanto o oeste da Bahia demonstrou baixa vulnerabilidade ambiental das áreas protegidas frente ao avanço das atividades agropecuárias, aspectos observados nos capítulos 3 e 4, os quais se evidenciam nas principais diferenças entre os dois grupos.

**Tabela 5.1** – Uso e ocupação dos solos nos grupos de dependência espacial “Baixo-Baixo” e Alto-Alto”.

Alto-Alto			Baixo-Baixo		
Código	Categoria de Uso e ocupação	Área (hectares)	Código	Categoria de Uso e ocupação	Área (hectares)
48	Outras Lavouras Perenes	505	30	Mineração	77
46	Café	2.136	29	Afloramento Rochoso	1.200
9	Silvicultura	3.016	20	Cana	9.254
29	Afloramento Rochoso	3.681	9	Silvicultura	49.045
24	Área Urbanizada	8.166	24	Área Urbanizada	49.487
33	Rio, Lago e Oceano	8.289	25	Outras Áreas não Vegetadas	53.893
62	Algodão	16.895	40	Arroz	93.157
11	Campo Alagado e Área Pantanosa	72.877	41	Outras Lavouras Temporárias	103.097
25	Outras Áreas não Vegetadas	90.096	33	Rio, Lago e Oceano	287.534
41	Outras Lavouras Temporárias	323.073	21	Mosaico de Usos	338.076
3	Formação Florestal	414.785	12	Formação Campestre	555.826
21	Mosaico de Usos	502.627	39	Soja	645.572
39	Soja	519.461	11	Campo Alagado e Área Pantanosa	1.590.438
15	Pastagem	<b>787.880</b>	3	Formação Florestal	2.961.759
12	Formação Campestre	1.304.319	15	Pastagem	<b>5.911.668</b>
4	Formação Savânica	6.850.769	4	Formação Savânica	6.547.671

**Fonte:** Elaborada pelas autoras com base nos dados MapBiomias (2021).

De modo geral, os cenários de máximo otimismo (Figuras 5.8) apontam para uma predominância de áreas com alta sustentabilidade, sobretudo no norte e no leste da região, enquanto o cenário de máximo pessimismo (Figuras 5.10) reforça a baixa sustentabilidade do sudoeste do Matopiba, especialmente nas microrregiões do Tocantins. Ressalta-se que, quanto à sustentabilidade agroambiental, as microrregiões do Tocantins apresentaram baixo desempenho em todos os cenários, o que indica a necessidade de atenção às políticas de sustentabilidade. Além disso, as microrregiões desse Estado, no cenário neutro, eram ocupadas por aproximadamente 6,54 milhões de hectares de formação savânica, o que evidencia a importância no âmbito da preservação do Cerrado.

Para viabilizar o cenário de máximo otimismo, será necessário superar os desafios para o estabelecimento de uma agricultura sustentável no Matopiba. Nesse sentido, o cumprimento dos acordos internacionais de sustentabilidade da agricultura será possível por meio da ampliação do Plano ABC, da recuperação de áreas degradadas com manejo sustentável, do fortalecimento do crédito para agricultores familiares, da expansão das VSS, do acesso à assistência técnica especializada e do planejamento de ações de combate a incêndios. Essas medidas dependem de investimentos em políticas públicas voltadas para o estabelecimento de uma agricultura sustentável e para que os acordos com as organizações internacionais se cumpram.

Em síntese, os resultados apontam para a necessidade de políticas diferenciadas no Matopiba, considerando suas heterogeneidades internas. No Tocantins, medidas de combate ao desmatamento e às queimadas, de recuperação de áreas degradadas e de fortalecimento da agricultura familiar são prioridades imediatas. No Maranhão e no Piauí, investimentos em assistência técnica e infraestrutura podem alavancar o desempenho de

pequenos agricultores, ampliando a sustentabilidade regional (Figura 5.2). Já na Bahia, onde os indicadores de desenvolvimento socioeconômico apresentam uma trajetória de melhora, o desafio é consolidar práticas sustentáveis na agropecuária, evitando retrocessos ambientais.

**Tabela 5.2** – Síntese dos cenários de sustentabilidade agroambiental.

Cenário	Interpretação linguística	Padrão espacial predominante	I de Moran	Clusters principais
Máximo Otimismo	Ênfase no melhor caso	Alta sustentabilidade predominante; Baixas no sudoeste do Matopiba, geocampos do Tocantins.	0,43	Alto-Alto: Microrregiões da Bahia, Maranhão e Piauí; Baixo-Baixo: Microrregiões do Tocantins; Alto-Baixo: Dianópolis (Outlier).
Máximo Pessimismo	Ênfase no pior caso	Baixa sustentabilidade predominante; Geocampos com alta sustentabilidade em Gurupi (TO) e Dianópolis (TO).	0,393	Alto-Alto: Microrregiões do Tocantins; Baixo-Baixo: Microrregiões do Maranhão.
Neutro	Não se assume preferências	Norte/Leste do Matopiba mais altos; Oeste do Matopiba mais baixos.	0,595	Alto-Alto: Microrregiões da Bahia e do Piauí; Baixo-Baixo: Microrregiões do Tocantins e Maranhão.

**Fonte:** Elaborada pelas autoras com base nos dados da pesquisa.

O Matopiba em seu Plano de Desenvolvimento agropecuário prevê o desenvolvimento sustentável do agronegócio, e o que vem sendo retratado em diversas pesquisas é o aumento dos impactos ambientais provenientes do agronegócio. Em vista disso, é urgente a necessidade de priorizar políticas de sustentabilidade para reverter essa situação e o compromisso com a sustentabilidade e toda a sociedade. A extensão do Matopiba, de aproximadamente 73 milhões de hectares, integrando quatro estados diferentes, representa um desafio para análises espaciais, pois há características sociais e econômicas internas muito heterogêneas. Apesar disso, o modelo de análise multicritério foi capaz de representar a sustentabilidade da região como um todo e apontar direcionamentos específicos. Portanto, a análise integrada dos cenários reforça a contribuição da metodologia de análise multicritério *fuzzy* para o entendimento da sustentabilidade agroambiental em regiões complexas como o Matopiba. Mais do que fornecer um diagnóstico estático, a cenarização possibilita explorar futuros possíveis e preferenciais, alinhando-se a uma perspectiva propositiva de planejamento territorial. Essa discussão prepara o terreno para a seção seguinte 5.6, dedicada às conclusões do capítulo, onde os principais achados serão articulados às questões centrais da tese e às implicações para o planejamento das atividades agrícolas de forma sustentável.

## 5.6 Conclusão do capítulo

A sustentabilidade agroambiental do Matopiba foi avaliada por meio de análise multicritério espacial baseada em lógica *fuzzy*. Os resultados evidenciaram diferentes cenários de sustentabilidade para a região. Em geral, os geocampos com baixa sustentabilidade estavam localizados em microrregiões do Tocantins. Nessas áreas, as atividades econômicas

mais proeminentes eram ligadas à pecuária, e a pastagem ocupava uma área considerável. Os resultados apontaram as localidades que, em cada cenário, necessitam de maior atenção quanto a políticas públicas de fomento à sustentabilidade agroambiental, o que possibilita a construção de alternativas para o cumprimento do Plano de Desenvolvimento Agropecuário da região.

O Matopiba, apesar da intencionalidade de estabelecer a sustentabilidade nas práticas agrícolas, não consegue garantir essa perspectiva em toda sua região. Visto que, no cenário neutro, o mais aproximado da realidade, havia áreas com sustentabilidade agroambiental muito baixa. Os resultados, ao identificarem as áreas de maior atenção e a necessidade de práticas mais sustentáveis, reforçam a urgência de políticas públicas que garantam a prática de atividades agrícolas de menor impacto, bem como o desenvolvimento de estudos direcionados a essas localidades específicas.

Conforme apontado pelas organizações internacionais de meio ambiente, a avaliação da sustentabilidade em sistemas agrícolas é de suma importância para a construção de políticas públicas. A ferramenta de análise multicritério espacial *fuzzy* demonstrou ser eficiente para a avaliação da sustentabilidade agroambiental do Matopiba, além de oferecer a vantagem de uma análise flexível, de acordo com as preferências quanto à sustentabilidade, e pode ser aplicada em diversas áreas de interesse.

As limitações deste estudo decorrem, principalmente, da dificuldade inerente de captar variáveis agrícolas diretamente relacionadas à sustentabilidade no escopo do Censo, além do vasto intervalo temporal entre as edições do Censo. Os dados primários sobre a agropecuária brasileira são predominantemente obtidos por meio do Censo Agropecuário, realizado aproximadamente a cada dez anos pelo IBGE. Contudo, é fundamental notar que as informações coletadas são de natureza autodeclaratória, o que pode introduzir vieses na análise. Ainda assim, a metodologia adotada permitiu demonstrar cenários e oferecer uma avaliação que se aproxima da realidade da sustentabilidade agroambiental em 2017.

## 6 SÍNTESE INTEGRADA: TERRAS AGRÍCOLAS ABANDONADAS, VULNERABILIDADE EM ÁREAS DE PROTEÇÃO AMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE AGROAMBIENTAL NO MATOPIBA

O objetivo central desta tese foi avaliar aspectos associados à sustentabilidade agroambiental do Matopiba sob diferentes perspectivas espaciais e analíticas. Para isso, a pesquisa estruturou-se em três investigações principais: a identificação de terras agrícolas abandonadas no Matopiba (Capítulo 3), a análise da vulnerabilidade ambiental em áreas protegidas do Oeste da Bahia (Capítulo 4) e a proposição de um indicador de sustentabilidade agroambiental por meio de análise multicritério espacial *fuzzy* (Capítulo 5).

O produto central desta tese consiste em uma leitura integrada da sustentabilidade agroambiental do Matopiba, construída por meio da articulação entre esses três eixos analíticos. Este capítulo tem, portanto, a finalidade de materializar essa integração, explicitando como os resultados se complementam no território e, em conjunto, constroem um diagnóstico espacialmente explícito da sustentabilidade agroambiental na recente fronteira agrícola brasileira.

### 6.1 A construção progressiva do diagnóstico: do problema ao modelo

A avaliação proposta consistiu em desagregar a complexidade inerente ao conceito de sustentabilidade agroambiental em frentes analíticas específicas para, em seguida, promover sua síntese integrativa. Essa estratégia permitiu abordar diferentes manifestações da (in)sustentabilidade na região, preservando a coerência metodológica de cada análise e possibilitando uma leitura integrada ao final.

#### 6.1.1 A identificação de um sintoma crítico: terras agrícolas abandonadas (Capítulo 3)

O Capítulo 3 partiu da identificação do fenômeno de abandono de terras agrícolas. Ao mapear e quantificar aproximadamente 4 milhões de hectares abandonados entre 2006 e 2021, o estudo revelou sintomas associados a falhas no manejo agrícola, pressões socioeconômicas e conflitos fundiários, frequentemente relacionados a processos de insustentabilidade agroambiental. A distribuição espacial heterogênea do abandono, com destaque para um arco do abandono localizado na porção oeste do Matopiba, indica que os processos de expansão e consolidação agrícolas não ocorrem de forma homogênea no território.

Esse resultado demonstrou que , paralelamente à narrativa de crescimento produtivo,

coexistem dinâmicas de abandono que comprometem a renda dos agricultores, afetam a segurança alimentar local e ampliam a suscetibilidade à erosão e à degradação dos solos (Santos e Ruchkys, 2025). Assim, o abandono de terras agrícolas foi interpretado como uma manifestação terminal de processos produtivos insustentáveis.

#### 6.1.2 A avaliação da pressão sobre elementos naturais protegidos (Capítulo 4)

O Capítulo 4 direcionou o foco para os elementos destinados à conservação ambiental na região oeste da Bahia, por meio da análise da vulnerabilidade ambiental. A aplicação da Análise Hierárquica de Processos (AHP) espacial permitiu avaliar a exposição dessas unidades à pressão das atividades antrópicas provenientes do entorno, evidenciando diferenças significativas entre categorias de proteção, como a FLONA de Cristópolis e a APA de São Desidério.

Os resultados confirmaram a existência de pressões ambientais relevantes, sobretudo em áreas próximas a cursos d'água, destacando conflitos espaciais entre a expansão agropecuária e os limites ecológicos representados pelas unidades de conservação. Este capítulo acrescentou uma dimensão fundamental ao diagnóstico ao evidenciar que a proteção legal, por si só, não garante a integridade ambiental, reforçando a necessidade de abordagens integradas de gestão ambiental.

#### 6.1.3 A modelagem integrada da sustentabilidade agroambiental (Capítulo 5)

O Capítulo 5 constituiu o esforço de integração metodológica da tese, por meio da proposição de um indicador de sustentabilidade agroambiental baseado em análise multicritério espacial *fuzzy*. A metodologia integrou dimensões ambientais, econômicas e sociais, incluindo, entre seus critérios, a densidade de terras agrícolas abandonadas identificadas no Capítulo 3.

A aplicação do modelo resultou em cenários distintos de sustentabilidade (otimista, pessimista e neutro), evidenciando padrões espaciais claros de (in)sustentabilidade no Matopiba, com destaque para as microrregiões do Tocantins associadas à pecuária extensiva. O modelo permitiu identificar áreas prioritárias para intervenção, além de reduzir as incertezas metodológicas observadas em abordagens multicritério tradicionais, como as empregadas no Capítulo 4, por meio do uso de funções de pertinência *fuzzy*.

## 6.2 Conexões e articulações entre os resultados

Embora os capítulos tenham sido desenvolvidos de forma metodologicamente independente, seus resultados não são isolados. Ao contrário, formam um conjunto coerente de evidências que se reforçam mutuamente quando analisadas de forma integrada.

### 6.2.1 Convergência metodológica

Os desafios metodológicos enfrentados na aplicação da AHP no Capítulo 4, especialmente relacionados à subjetividade na ponderação dos critérios e à categorização rígida das variáveis, subsidiaram a adoção da lógica *fuzzy* no Capítulo 5. Esse percurso metodológico evidencia um amadurecimento da abordagem multicritério ao longo da tese, culminando em um modelo mais flexível e adaptável à complexidade da sustentabilidade agroambiental.

### 6.2.2 A convergência espacial e conceitual

Há uma convergência espacial e conceitual significativa entre os achados. As áreas identificadas com baixa sustentabilidade agroambiental no modelo baseado em lógica *fuzzy* (Capítulo 5), particularmente no Tocantins, são regiões que potencialmente integram o “arco de abandono” mapeado no Capítulo 3, sugerindo uma relação entre práticas insustentáveis, possível degradação e eventual abandono da terra. Simultaneamente, a pressão antrópica sobre as áreas protegidas no Oeste da Bahia, avaliada no Capítulo 4, constitui uma faceta do conflito entre o modelo de expansão agrícola e a conservação, contribuindo para a baixa sustentabilidade na região. Juntos, os capítulos desenharam um panorama em que expansão, abandono e vulnerabilidade coexistem, revelando as contradições internas do processo de fronteira.

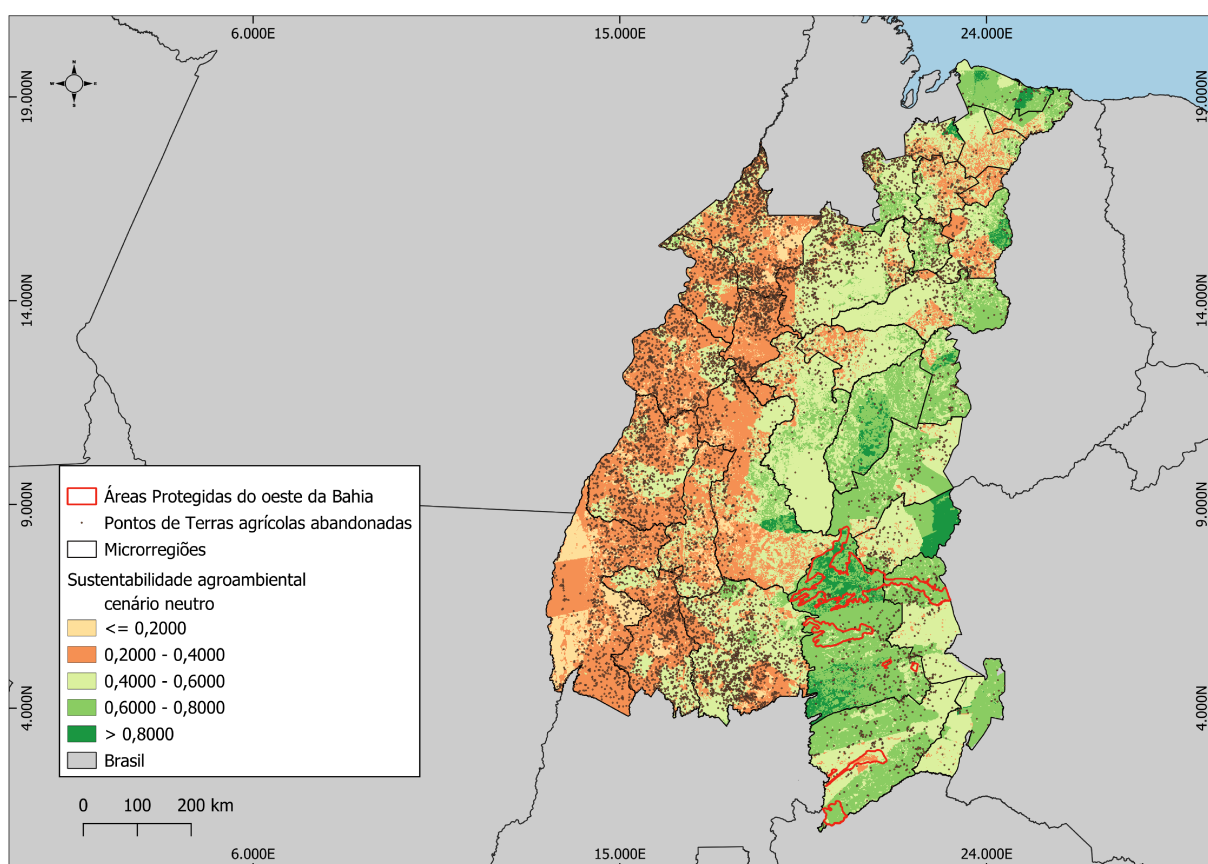
Observa-se uma convergência espacial e conceitual entre os achados. As áreas identificadas com baixa sustentabilidade agroambiental no modelo baseado em lógica *fuzzy* tendem a coincidir com regiões onde se concentram terras agrícolas abandonadas, sugerindo uma relação entre práticas produtivas insustentáveis, degradação ambiental e abandono da terra. De forma complementar, a vulnerabilidade ambiental das áreas protegidas no oeste da Bahia evidencia a pressão exercida pela dinâmica agrícola sobre os remanescentes naturais.

Ressalta-se que a detecção de geocampos de abandono agrícola em Áreas Protegidas justifica-se por existirem diferentes categorias de Unidades de Conservação, nas quais a exploração de recursos por populações residentes é permitida, desde que condicionada a um Plano de Manejo e às normas dos órgãos fiscalizadores, como, por exemplo, a categoria

de uso sustentável. Contudo, a representatividade espacial desse abandono foi ínfima, não exercendo influência direta na avaliação da sustentabilidade agroambiental da região.

Articulação entre terras agrícolas abandonadas, áreas protegidas e sustentabilidade agroambiental ocorre no plano interpretativo, e não por meio da sobreposição direta de modelos analíticos. As terras agrícolas abandonadas representam um sintoma da insustentabilidade de determinados modos de produção, enquanto as áreas protegidas funcionam como limites ecológicos que evidenciam a tensão entre produção e conservação. Os cenários de sustentabilidade agroambiental integram essas dinâmicas ao revelar espacialmente regiões onde práticas produtivas intensivas, abandono de terras e pressão sobre áreas ambientalmente sensíveis coexistem. A leitura integrada dos resultados demonstra que áreas com baixa sustentabilidade agroambiental tendem a concentrar tanto processos de abandono quanto altos níveis de pressão sobre os ecossistemas protegidos, configurando zonas críticas para o planejamento territorial. Neste contexto, apresenta-se a Figura 6.1, que consiste em um mapa de síntese interpretativa da sustentabilidade agroambiental no Matopiba, elaborado com base na leitura integrada dos principais resultados desta tese.

**Figura 6.1** – Mapa de síntese territorial da sustentabilidade agroambiental no Matopiba



**Fonte:** Elaborada pelas autoras com base nos dados da pesquisa.

O mapa apresenta, como camada de base, o cenário neutro do índice de sustentabilidade agroambiental, obtido por meio de análise multicritério espacial fuzzy (Capítulo 5). Neste cenário, os pontos amostrais de terras agrícolas abandonadas (Capítulo 3) são sobrepostos aos limites das unidades de conservação analisadas (Capítulo 4). Observa-se que a maior densidade de pontos de abandono concentra-se em áreas de baixa sustentabilidade agroambiental. Sob outra perspectiva, identificaram-se zonas críticas de vulnerabilidade ambiental nas áreas protegidas do Oeste da Bahia, associadas também a baixos índices de sustentabilidade. Contudo, prevaleceram áreas de alta vulnerabilidade com elevada sustentabilidade agroambiental, o que reforça a coexistência desses fenômenos no interior das unidades de conservação e a complexidade da gestão territorial nessa parcela do Matopiba.

Destaca-se que este mapa não representa um novo modelo analítico, mas sim uma síntese interpretativa, destinada a evidenciar as relações entre o abandono de terras, a pressão sobre áreas protegidas e a sustentabilidade agroambiental no Matopiba.

### 6.3 Implicações consolidadas para políticas públicas e gestão ambiental

A leitura integrada dos resultados desta tese, ao articular os processos de abandono de terras agrícolas, a vulnerabilidade ambiental em áreas protegidas e os cenários de sustentabilidade agroambiental, permite orientar políticas públicas de forma espacialmente explícita, superando abordagens setoriais fragmentadas. As evidências produzidas demonstram que os desafios da sustentabilidade no Matopiba não se distribuem de forma homogênea na região, o que exige estratégias diferenciadas de gestão ambiental e de planejamento territorial.

#### 6.3.1 Direcionamento espacialmente explícito de políticas públicas

Para as áreas com elevada concentração de terras agrícolas abandonadas (Capítulo 3), tornam-se prioritárias políticas de revitalização produtiva que fortaleçam a agricultura familiar, ampliem o acesso ao crédito e à assistência técnica e incentivem práticas adequadas de manejo do solo. Essas ações podem contribuir para reduzir o abandono de terras e fomentar sistemas produtivos mais resilientes, alinhados a princípios agroecológicos, consórcios de culturas e à integração lavoura-pecuária.

Nas áreas protegidas que apresentaram maior vulnerabilidade ambiental (Capítulo 4), destacam-se como prioritárias ações de fiscalização integrada, a implantação e o fortalecimento de zonas-tampão e o desenvolvimento de programas de educação ambiental

voltados aos proprietários do entorno. Essas medidas são fundamentais para mitigar os impactos indiretos da expansão agropecuária e preservar os serviços ecossistêmicos associados às unidades de conservação.

Para microrregiões com baixos níveis de sustentabilidade agroambiental identificados no modelo (Capítulo 5), recomenda-se a adoção de políticas específicas de transição produtiva, associadas ao monitoramento rigoroso do desmatamento, da degradação do solo e do uso de insumos agrícolas. Além disso, estudos mais detalhados sobre as causas locais da insustentabilidade podem subsidiar ações diretas de orientação técnica e de promoção de práticas de manejo sustentável.

### 6.3.2 Fortalecimento da governança e do planejamento integrado

A superação das contradições apontadas requer uma governança que articule as políticas setoriais, de forma a promover a descentralização das políticas públicas por meio da combinação de estratégias *bottom-up* com as *top-down*, organizadas por intervenção governamental, no sentido de financiar políticas de infraestrutura e de envolvimento da população local. Os planos de desenvolvimento agrícola (como o próprio PDA-Matopiba) podem incorporar os diagnósticos de abandono e de vulnerabilidade ambiental, utilizando ferramentas quantitativas, como o modelo baseado em lógica *fuzzy* proposto, para definir zonas prioritárias de ação. Além disso, a gestão territorial deve ser integrada, considerando simultaneamente critérios ambientais, econômicos e sociais, como os abordados no Capítulo 5, bem como os das populações envolvidas no processo.

### 6.4 Reflexões finais sobre a abordagem da pesquisa e perspectivas

Estudos espaciais e estatísticos são fundamentais para o monitoramento ambiental. No Matopiba, tais ferramentas permitiram o diagnóstico de áreas críticas, fundamentando as discussões sobre os limites e os desafios da sustentabilidade.

#### 6.4.1 Avaliação da abordagem metodológica integrada

A avaliação conjunta dos métodos e dos resultados dos Capítulos 3, 4 e 5 mostrou-se eficaz para capturar a multidimensionalidade e a complexidade espacial da sustentabilidade agroambiental no Matopiba. As abordagens permitiram a identificação de problemas específicos e a avaliação integrada, atendendo ao objetivo proposto para a tese e oferecendo metodologias quantitativas replicáveis.

#### 6.4.2 Limitações da pesquisa

As principais limitações observadas ao longo do desenvolvimento dessa pesquisa são discutidas nesta seção. Especialmente no Capítulo 5, pode-se mencionar a dependência de dados do Censo Agropecuário, de natureza autodeclaratória e com um grande intervalo temporal entre os Censos. Além disso, a dificuldade inerente à definição das variáveis relevantes para a sustentabilidade. Finalmente, a subjetividade envolvida na definição das funções de pertinência e na ponderação de critérios, que dependem, respectivamente, do agente responsável pela definição do modelo e do interesse do cenário a ser construído. A análise também poderia ser enriquecida com a incorporação de outros indicadores sociais e ambientais. Apesar disso, a metodologia proposta no Capítulo 5 pode ser aplicada com novas variáveis e considerando outras funções de pertinência, o que a torna uma ferramenta quantitativa replicável.

#### 6.5 Sugestões para pesquisas futuras

Com base nas limitações e nos achados, sugere-se:

- a) A aplicação do modelo *fuzzy* com dados mais recentes;
- b) Inclusão de variáveis sociais e de bem-estar mais diretas;
- c) Investigações qualitativas aprofundadas sobre as causas locais do abandono de terras nas microrregiões críticas;
- d) Estudos de longo prazo sobre a efetividade das diferentes categorias de áreas protegidas no Matopiba em frear a degradação;
- e) A adaptação da metodologia para avaliar a trajetória temporal da sustentabilidade na região.

#### 6.6 Conclusão do capítulo

A análise integrada dos Capítulos 3, 4 e 5 demonstra que o Matopiba constitui uma região marcada por dinâmicas contraditórias, na qual a expansão produtiva convive com o abandono de terras agrícolas, a pressão sobre áreas legalmente protegidas e padrões heterogêneos de sustentabilidade agroambiental.

A contribuição central desta tese reside em oferecer uma leitura integrada da sustentabilidade agroambiental no Matopiba, sustentada por metodologias quantitativas

robustas e espacialmente explícitas. Ao articular os processos de abandono de terras, a vulnerabilidade ambiental em áreas protegidas e os cenários de sustentabilidade agroambiental, a pesquisa materializa um diagnóstico capaz de subsidiar o planejamento territorial e a revisão de políticas públicas, como o PDA-Matopiba.

Esses subsídios são fundamentais para que a mais recente fronteira agrícola brasileira avance no equilíbrio entre a produção agropecuária, a conservação ambiental e a justiça social, contribuindo para a construção de um modelo de desenvolvimento verdadeiramente sustentável.

## 7 CONCLUSÃO

Esta tese buscou compreender e avaliar a sustentabilidade agroambiental no Matopiba, região que se consolidou como a mais recente fronteira agrícola brasileira e que concentra tanto potencial produtivo quanto intensos desafios socioambientais. O trabalho foi estruturado em formato de coletânea de artigos científicos, permitindo que cada capítulo explorasse dimensões específicas do problema e, ao mesmo tempo, contribuísse para a construção de uma abordagem metodológica integrada. Assim, a pesquisa partiu do reconhecimento das lacunas teóricas e metodológicas, avançou para a análise de questões concretas e culminou na aplicação de um modelo de análise multicritério espacial *fuzzy*, que possibilitou a identificação de áreas de sustentabilidade agroambiental.

No Capítulo 2, as revisões bibliométricas evidenciaram a ausência de estudos que tratassem de forma sistemática a sustentabilidade agroambiental do Matopiba, ao mesmo tempo em que revelaram a ampla difusão das análises multicritério em contextos de decisão ambiental e agrícola. Identificou-se, contudo, que parte dos trabalhos negligencia o tratamento das incertezas, aspecto que justificou a adoção da lógica *fuzzy* nesta pesquisa. Esse capítulo forneceu, portanto, a base teórica e metodológica sobre a qual os demais se apoiaram.

No Capítulo 3, com a identificação de áreas agrícolas abandonadas entre 2006 e 2021, a análise espacial revelou aproximadamente quatro milhões de hectares de terras abandonadas, principalmente no Tocantins e no Maranhão, áreas que apresentam riscos à segurança alimentar, erosão e vulnerabilidade ao fogo. Esses achados não apenas revelam uma problemática agrária de grande relevância, mas também serviram como critério na avaliação posterior da sustentabilidade agroambiental.

No Capítulo 4, a análise da vulnerabilidade ambiental de áreas protegidas do oeste baiano reforçou a importância de integrar aspectos ambientais e territoriais ao planejamento de áreas protegidas. Os resultados mostraram que as maiores vulnerabilidades se concentram nas áreas próximas aos rios, destacando fragilidades que, se não tratadas, podem comprometer a conservação ambiental em um contexto de forte pressão antrópica. Além de seu valor empírico, este capítulo trouxe um avanço metodológico ao explorar a atribuição de pesos via análise hierárquica de processos, evidenciando a necessidade de lidar com as incertezas inerentes a esse procedimento.

Essas etapas convergiram no Capítulo 5, no qual se aplicou a análise multicritério espacial baseada em lógica *fuzzy* para avaliar a sustentabilidade agroambiental do Matopiba em três cenários distintos de pessimismo, otimismo e neutro. O modelo mostrou-se flexível

e eficaz, permitindo captar a heterogeneidade regional e identificar microrregiões críticas, com foco no Tocantins, onde a pecuária é predominante e houve registro de impactos como desmatamento e queimadas. Ao mesmo tempo, os cenários otimistas revelaram potencialidades associadas à contextos de menor pressão produtiva, demonstrando que a sustentabilidade agroambiental não é homogênea, mas resultado de dinâmicas locais específicas.

No conjunto, os capítulos revelam que a sustentabilidade agroambiental do Matopiba é marcada por contrastes e contradições: de um lado, a expansão do agronegócio e os impactos ambientais decorrentes; de outro, experiências ligadas à pequena agricultura, como a agricultura Familiar no Matopiba que é superior em número de estabelecimentos e responsável por uma produção agrícola mais diversificada e com características de abastecimento do mercado interno (Santos *et al.*, 2024). A principal contribuição desta tese reside na demonstração de que a análise multicritério *fuzzy*, aplicada em escala espacial, constitui uma ferramenta capaz de lidar com a complexidade e a incerteza desses processos, oferecendo subsídios valiosos para políticas públicas mais ajustadas às realidades locais.

As limitações deste estudo derivaram, principalmente, da dependência de bases de dados secundários e agregados, o que impôs restrições à captação de variáveis qualitativas relacionadas às práticas sociais e institucionais. Adicionalmente, a escala de análise adotada (municipal/microrregional) limita a observação detalhada de processos que se manifestam em nível intramunicipal. Tais limitações, contudo, abrem caminho para pesquisas futuras, como a integração de indicadores de serviços ecossistêmicos, a incorporação de dados climáticos e a articulação com metodologias participativas que incluam agricultores e comunidades locais.

Em síntese, a tese cumpriu o objetivo de propor e aplicar uma ferramenta inovadora para avaliar a sustentabilidade agroambiental no Matopiba, gerando produtos científicos originais e contribuindo para a ciências ambientais, econômicas, geográficas, de modo amplo para a literatura sobre fronteiras agrícolas e para o planejamento territorial sustentável. Ao integrar análises bibliométricas, exercícios empíricos e modelagem *fuzzy*, o trabalho avançou no sentido de oferecer não apenas um diagnóstico, mas também um instrumental metodológico que pode ser aplicado a outros contextos, dentro e fora do Brasil. O Matopiba, nesse sentido, não é apenas um objeto de estudo, mas um lugar para refletir sobre os desafios globais de conciliar produção agrícola, conservação ambiental e justiça social.

Além dos avanços metodológicos e empíricos, a tese também resultou em produtos científicos relevantes. O Capítulo 3, que tratou do abandono de terras agrícolas no Matopiba, originou o artigo “A geospatial insight into farmland abandonment in Matopiba: the emerging frontier of Brazilian agriculture”, publicado em 2025 na revista *Regional*

*Environmental Change*, periódico de alto impacto internacional. Esse resultado atesta não apenas a originalidade da pesquisa, mas também sua inserção no debate científico global sobre fronteiras agrícolas, mudanças de uso da terra e sustentabilidade.

Os resultados desta tese demonstram que o desafio da sustentabilidade no Matopiba transcende o debate sobre a mera expansão agrícola, exigindo, em vez disso, uma reforma profunda nas políticas de uso e manejo do solo para garantir a integridade do Cerrado. Que esta pesquisa sirva como um ponto de partida crucial para que os tomadores de decisão transformem os achados em ações concretas, assegurando que essa fronteira agrícola se torne local de valorização da pequena agricultura e de comunidades tradicionais. Pois, os resultados demonstram que o Matopiba é uma fronteira resultado da expansão do capital mundial que apesar de mencionar em seu documento de institucionalização a preocupação com os impactos ambientais e sociais a população e ao meio ambiente, apresenta áreas que necessitam de atenção quanto a sustentabilidade agroambiental e que a priori o conteúdo do documento de institucionalização do Matopiba ao utilizar o termo sustentabilidade agroambiental aparenta uma ação chamada de *greenwashing*, como uma maneira de maquiagem os impactos negativos da expansão do agronegócio na região.

A alteração desse cenário depende da implementação de políticas públicas que assegurem a permanência digna no campo, isso abrange desde pequenos agricultores até povos originários e demais grupos historicamente marginalizados no meio rural. A soberania e a segurança alimentar no Brasil estão intrinsecamente ligadas a políticas de fomento à agricultura familiar, uma vez que este setor é o principal responsável pelo abastecimento do mercado interno.

### 7.1 Implicações para políticas públicas e planejamento territorial

O modelo de avaliação da sustentabilidade agroambiental proposto evidenciou áreas com baixa sustentabilidade. Em específico, a necessidade de revisão do crédito (Plano ABC+): O estudo revelou que as áreas com baixa sustentabilidade agroambiental (agrupamento Baixo-Baixo no Tocantins) estão fortemente correlacionadas com a predominância de atividades extensivas, como a pecuária tradicional. Recomenda-se que as instituições financeiras (como o Banco do Brasil e BNDES), responsáveis pela liberação de crédito no âmbito do Plano ABC+, condicionem o acesso a taxas de juros mais favoráveis à adoção de tecnologias de Intensificação Sustentável, como a Integração Lavoura-Pecuária-Floresta, desencorajando explicitamente o financiamento para a expansão de pastagens em áreas recém-desmatadas ou com histórico de manejo inadequado.

Direcionamento da Fiscalização e do Monitoramento: A análise espacial multicritério identificou microrregiões específicas nos estados do Tocantins como pontos focais de baixa sustentabilidade. O Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA) pode utilizar o mapa de cenários de sustentabilidade gerado por este estudo para priorizar e otimizar os recursos de fiscalização. O monitoramento por satélite agregado aos dados do Cadastro Ambiental Rural e as vistorias em campo devem ser intensificados nestas áreas, visando a coibição de práticas de manejo insustentáveis e o abandono de terras, que são precursores de degradação.

Nas áreas de baixa sustentabilidade os órgãos estaduais e federais de Assistência Técnica e Extensão Rural (ATER) devem desenvolver programas específicos e metodologias adaptadas para as microrregiões e áreas de geocompos destacadas com baixa sustentabilidade agroambiental e as áreas em abandono de terras agrícolas, focando na capacitação para a Gestão sustentável de Uso da Terra e no Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD), com ênfase na adoção de Padrões Voluntários de Sustentabilidade (VSS) como ferramenta de mercado.

## REFERÊNCIAS

- AATR, Associação de Advogados de Trabalhadores Rurais. **Na fronteira da (i)legalidade: desmatamento e grilagem no Matopiba**. Salvador, BA, 2021. Disponível em: <<https://www.matopibagrilagem.org/>>. Acesso em: 8 Ago. 2024.
- ABDEL-BASSET, Mohamed; MOHAMED, Rehab. A novel plithogenic topsis-critic model for sustainable supply chain risk management. **Journal of Cleaner production**, Elsevier, v. 247, p. 119586, 2020.
- ABDI-DEHKORDI, Mehri; BOZORG-HADDAD, Omid; CHU, Xuefeng. Development of a combined index to evaluate sustainability of water resources systems. **Water Resources Management**, Springer, v. 35, n. 9, p. 2965–2985, 2021.
- ADUN, Humphrey. Sustainability energy security: 20 years assessment of the west african nations using a comprehensive entropy-topsis analysis. **Environmental Science and Pollution Research**, Springer, v. 30, n. 33, p. 81093–81112, 2023.
- AGARWAL, Reema; NISHAD, Anil Kumar. A fuzzy mathematical modeling for evaluation and selection of a best sustainable and resilient supplier by using edas technique. **Process Integration and Optimization for Sustainability**, Springer, v. 8, n. 1, p. 71–80, 2024.
- ALEXANDRESCU, Filip M; PIZZOL, Lisa; ZABEO, Alex; RIZZO, Erika; GIUBILATO, Elisa; CRITTO, Andrea. Identifying sustainability communicators in urban regeneration: Integrating individual and relational attributes. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 173, p. 278–291, 2018.
- ALI, Shahid; TECHATO, Kuaanan; TAWEEKUN, Juntakan; GYAWALI, Saroj. Assessment of land use suitability for natural rubber using gis in the u-tapao river basin, thailand. **Kasetsart Journal of Social Sciences**, v. 41, n. 1, p. 110–117, 2020.
- ALTINTAS, Elif; UTLU, Zafer. Planning energy usage in electricity production sector considering environmental impacts with fuzzy topsis method & game theory. **Cleaner Engineering and Technology**, Elsevier, v. 5, p. 100283, 2021.
- AN, Da; XI, Beidou; WANG, Yue; XU, Di; TANG, Jun; DONG, Lichun; REN, Jingzheng; PANG, Chengfang. A sustainability assessment methodology for prioritizing the technologies of groundwater contamination remediation. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 112, p. 4647–4656, 2016.
- ANDRADES, Tiago Oliveira de; GANIMI, Rita de Cássia Novaes. Revolução verde e a apropriação capitalista. **Revista CES**, v. 21, p. 43–56, 2007.
- ANSELIN, Luc. Local indicators of spatial association—LISA. **Geographical Analysis**, Wiley Online Library, v. 27, n. 2, p. 93–115, 1995. doi: 10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x.
- ANURADHA; GUPTA, Sandeep. Ahp-based multi-criteria decision-making for forest sustainability of lower himalayan foothills in northern circle, india—a case study. **Environmental Monitoring and Assessment**, Springer, v. 194, n. 12, p. 849, 2022.

ARAYA-MUÑOZ, Dahyann; METZGER, Marc J; STUART, Neil; WILSON, A Meriwether W; CARVAJAL, Danilo. A spatial fuzzy logic approach to urban multi-hazard impact assessment in concepción, chile. **Science of the Total Environment**, Elsevier, v. 576, p. 508–519, 2017.

ARCOVERDE, Gustavo Felipe Balué; MENEZES, Julia Alves; PAZ, Mariana Gutierrez Arteiro; BARROS, Jocilene Dantas; GUIDOLINI, Janaína Ferreira; BRANCO, Evandro Albiach; ANDRADE, Pedro Ribeiro De; PULICE, Sergio Mantovani Paiva; OMETTO, Jean Pierre Henry Balbaud. Sustainability assessment of Cerrado and Caatinga biomes in Brazil: A proposal for collaborative index construction in the context of the 2030 agenda and the water-energy-food nexus. **Frontiers in Physics**, Frontiers Media SA, v. 10, p. 1060182, 2023.

ARRAES, Ronaldo A.; DINIZ, Marcelo B.; DINIZ, Márcia J. T. Curva ambiental de kuznets e desenvolvimento econômico sustentável. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural, v. 44, n. 3, p. 525–547, 2006.

ATTRI, Shubham Dutt; SINGH, Shweta; DHAR, Atul; POWAR, Satvasheel. Multi-attribute sustainability assessment of wastewater treatment technologies using combined fuzzy multi-criteria decision-making techniques. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 357, p. 131849, 2022.

BAHIA, Governo do Estado da. Decreto estadual n.º 7971 de 05 de junho de 2001. Altera a poligonal da Área de proteção ambiental - apa bacía do rio de janeiro, e dá outras providências. **Diário Oficial do Governo do Estado da Bahia**, 2001.

BAHIA, Governo do Estado da. Decreto estadual n.º 10020 de 05 de junho de 2006. Cria a Área de proteção ambiental de são desidério, no município de são desidério, e dá outras providências. **Diário Oficial do Governo do Estado da Bahia**, 2006.

BALBINO, Luiz Carlos; CORDEIRO, Luiz Adriano Maia; MARTÍNEZ, Gladys Beatriz. Contribuições dos sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ilpf) para uma agricultura de baixa emissão de carbono. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, n. 6, p. 1163–1175, 2011.

BARBOSA-SILVA, Rafael Gomes; ANTAR, Guilherme Medeiros. Description vs deforestation: *Couepia brevistaminea* (chrysobalanaceae), a new species on the frontier of agricultural expansion in the brazilian savanna. **Phytotaxa**, v. 471, n. 1, p. 38–46, 2020.

BAUSCH, Julia C; BOJÓRQUEZ-TAPIA, Luis; EAKIN, Hallie. Agro-environmental sustainability assessment using multicriteria decision analysis and system analysis. **Sustainability science**, Springer, v. 9, p. 303–319, 2014.

BECKER, Bertha K. A amazônia e a política ambiental brasileira. In: SANTOS, Milton; BECKER, Bertha K. (Ed.). **Território, territórios: ensaios sobre o ordenamento territorial**. 3. ed. Rio de Janeiro: Lamparina, 2011. p. 1–20.

BELCHIOR, Ernandez Barboza; ALCANTARA, Pedro Henrique Rezende; BARBOSA, CF. Perspectivas e desafios para a região do matopiba. **Embrapa Pesca e Aquicultura**, 2017.

BEZERRA, José Eudes. Agronegócio e ideologia: Contribuições teóricas. **Revista Nera**, n. 14, p. 112–124, 2012.

BINI, Dienice Ana; MIRANDA, Sílvia Helena Galvão de; VIAN, Carlos Eduardo de Freitas; PINTO, Luís Fernando Guedes. A dimensão econômica da sustentabilidade na agropecuária brasileira. **Revista de política agrícola**, v. 27, n. 2, p. 95–105, 2018.

BLANCO, Letícia de Souza; PORTELLA, Diego Augusto Pereira da Costa; SANTOS, João Lucas Alves dos; BARBOSA, Suzana Christina Oliveira; DIAS, José Lucas Rafare. O projeto de modernização brasileira e suas consequências socioambientais no matopiba. **Boletim Paulista de Geografia**, v. 1, n. 107, p. 121–136, 2022.

BOECHAT, Cássio Arruda; PITTA, Fábio Teixeira; PEREIRA, Lorena Izá; TOLEDO, Carlos de Almeida. Transformations of the agricultural frontier in Matopiba: From state planning to the financialisation of land. **IDS bulletin**, v. 54, n. 1, 2023.

BOGGIA, Antonio; MASSEI, Gianluca; PACE, Elaine; ROCCHI, Lucia; PAOLOTTI, Luisa; ATTARD, Maria. Spatial multicriteria analysis for sustainability assessment: A new model for decision making. **Land Use Policy**, Elsevier, v. 71, p. 281–292, 2018.

BOLFE, Édson L; VICTÓRIA, Daniel C; CONTINI, Elisio; BAYMA-SILVA, Gustavo; SPINELLI-ARAÚJO, Luciana; GOMES, Daniel. Matopiba em crescimento agrícola aspectos territoriais e socioeconômicos. **Revista de política agrícola**, v. 25, n. 4, p. 38–62, 2016.

BOTEGA, Carlos Eduardo; LIMA, Elaine da Silva; ROCHA, Elisa Cristina; FLORENTINO, Ligiane Aparecida; CERON, Marcos Speroni. Situação atual da produção na agropecuária de forma sustentável. In: **Sustentabilidade no agronegócio**. Tupã, SP, Brasil: Editora ANAP, 2020. p. 21–52. ISBN 978-65-86753-24-0.

BRASIL. Decreto nº 97.658, de 12 de abril de 1989. Cria nos estados da bahia e de minas gerais, o parque nacional grande sertão veredas, com limites que especifica e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, 1989.

BRASIL. Decreto s/nº de 18 de maio de 2001. Cria a floresta nacional de cristópolis, no município de cristópolis, estado da bahia, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, 2001.

BRASIL. decreto s/nº de 13 de dezembro de 2002. Cria o refúgio de vida silvestre das veredas do oeste baiano, nos municípios de jaborandi e cocos, no estado da bahia, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, 2002.

BRASIL. Decreto estadual s/nº de 05 de junho de 2006. Cria a Área de proteção ambiental do rio preto. **Diário Oficial do Governo do Estado da Bahia**, Bahia, 2006.

BRASIL. Lei nº 11.326, de 24 de julho de 2006. estabelece as diretrizes para a formulação da política nacional da agricultura familiar e empreendimentos familiares rurais. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, 2006.

BRASIL. **Dados do Cadastro Ambiental Rural**. 2023. Disponível em: <<https://consultapublica.car.gov.br/publico/estados/downloads>>. Acesso em: 6 Ago. 2024.

BRASIL. Decreto nº 11.767, de 1º de novembro de 2023. Plano de desenvolvimento agropecuário e agroindustrial do Matopiba. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, 2023.

- BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. **Agenda 2030 – ODS 12: Consumo e Produção Responsáveis**. 2025. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/a3p/item/11396-agenda-2030-ods12.html>>. Acesso em: 20 Maio 2025.
- BRUNDTLAND, Gro Harlem *et al.* **Nosso futuro comum**. 2. ed. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1991.
- CALMON, Daniela. Shifting frontiers: the making of Matopiba in Brazil and global redirected land use and control change. **The Journal of Peasant Studies**, Taylor & Francis, v. 49, n. 2, p. 263–287, 2022.
- CARDOSO, Milton José; MELO, Francisco de Brito; RIBEIRO, Valdenir Queiroz. Densidade populacional em cultivares de feijão-caupi com diferentes portes de planta, na região do matopiba. **Revista Caatinga**, v. 31, n. 1, p. 235–239, 2018.
- CAROF, Matthieu; COLOMB, Bruno; AVELINE, A. A guide for choosing the most appropriate method for multi-criteria assessment of agricultural systems according to decision-makers' expectations. **Agricultural Systems**, Elsevier, v. 115, p. 51–62, 2013.
- CARVALHO, Guilherme Oliveira Teixeira de; SILVA, Nádia Cristina da; SALVIO, Geraldo Majela Moraes. Vulnerabilidade ambiental em áreas de proteção ambiental (apa) do bioma mata atlântica na região sudeste brasileira. **Ciência Florestal**, SciELO Brasil, v. 32, p. 1575–1593, 2022.
- CASTRO, P; PEDROSO, R; LAUTENBACH, S; VICENS, R. Farmland abandonment in Rio de Janeiro: Underlying and contributory causes of an announced development. **Land Use Policy**, Elsevier, v. 95, p. 104633, 2020.
- CASTRO, Pedro Ivo Bastos de; YIN, He; JUNIOR, Paulo Domingos Teixeira; LACERDA, Eduardo; PEDROSO, Rui; LAUTENBACH, Sven; VICENS, Raúl Sánchez. Sugarcane abandonment mapping in Rio de Janeiro state Brazil. **Remote Sensing of Environment**, Elsevier, v. 280, p. 113194, 2022.
- CHEN, Yen-Chi. A tutorial on kernel density estimation and recent advances. **Biostatistics & Epidemiology**, Taylor & Francis, v. 1, n. 1, p. 161–187, 2017.
- COCA, Estevan; SOYER, Gabriel; JR, Ricardo Barbosa. Matopiba's disputed agricultural frontier: Between commodity crops and agrarian reform. **IDS Bulletin**, v. 54, n. 1, 2023.
- COLUSSI, Joana. **Matopiba: mudanças no uso da terra na nova fronteira agrícola do Brasil e impactos socioeconômicos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Centro de Estudos e Pesquisas em Agronegócios. Programa de Pós-Graduação em Agronegócios., 2017.
- CONGEDO, Luca. Semi-automatic classification plugin documentation. **Release**, v. 4, n. 0.1, p. 29, 2016.
- COPIELLO, Sergio. On the skewness of journal self-citations and publisher self-citations: Cues for discussion from a case study. **Learned Publishing**, Wiley Online Library, v. 32, n. 3, p. 249–258, 2019.
- CPRM, Serviço Geológico do Brasil. **Dados de Pedologia**. 2010. Disponível em: <<https://geosgb.sgb.gov.br/downloads/>>. Acesso em: 6 Ago. 2024.

CREPANI, Edison; MEDEIROS, JS de; FILHO, Pedro Hernandez; FLORENZANO, Teresa Gallotti; DUARTE, Valdete; BARBOSA, Cláudio Clemente Faria. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos: Inpe, 2001.

CUI, Jixiao; SUI, Peng; WRIGHT, David L; WANG, Dong; YANG, Jia; LV, Ziqin; CHEN, Yuanquan. A revised integrated framework to evaluate the sustainability of given cropping systems. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 289, p. 125716, 2021.

DELGADO, Guilherme Costa. A questão agrária no Brasil, 1950–2003. In: ARRETCHE, Marta; OUTROS (Ed.). **Questão Social e Políticas Sociais no Brasil Contemporâneo**. 2. ed. Brasília: IPEA, 2009. p. 51–90.

DÍAZ, G Ignacio; NAHUELHUAL, Laura; ECHEVERRÍA, Cristian; MARÍN, Sandra. Drivers of land abandonment in southern Chile and implications for landscape planning. **Landscape and Urban Planning**, Elsevier, v. 99, n. 3-4, p. 207–217, 2011.

ECK, Nees Jan Van; WALTMAN, Ludo. **VOSviewer manual**. 2023. Disponível em: <[www.vosviewer.com](http://www.vosviewer.com)>. Acesso em: 03 Set. 2023.

EMBRAPA. **GeoWebMatopiba: Sistema de Informações Geográficas para a Região do Matopiba**. Campinas: [s.n.], 2015. Disponível em: <<http://mapas.cnpm.embrapa.br/matopiba2015/>>. Acesso em: 20 Jul. 2023.

EMBRAPA, Serviço Nacional de Levantamento e Conservação. Súmula da 10ª Reunião Técnica de Levantamento de Solos. In: **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos**. Rio de Janeiro: [s.n.], 1979. p. 83.

EROL, Ismail; SENCER, Safiye; SARI, Ramazan. A new fuzzy multi-criteria framework for measuring sustainability performance of a supply chain. **Ecological Economics**, Elsevier, v. 70, n. 6, p. 1088–1100, 2011.

ESCOBAR, Neus; TIZADO, E Jorge; ERMGASSEN, Erasmus KHJ zu; LÖFGREN, Pernilla; BÖRNER, Jan; GODAR, Javier. Spatially-explicit footprints of agricultural commodities: Mapping carbon emissions embodied in Brazil's soy exports. **Global Environmental Change**, Elsevier, v. 62, p. 102067, 2020.

FAO, Food and Agriculture Organization. **FAOSTAT, Methods & Standards**. 2016. Disponível em: <<http://www.fao.org/ag/agn/nutrition/Indicatorsfiles/\Agriculture.pdf>>. Acesso em: 30 Set. 2023.

FARD, Moein Besharati; HAMIDI, Donya; EBADI, Mehdi; ALAVI, Javad; MCKAY, Gordon. Optimum landfill site selection by a hybrid multi-criteria and multi-agent decision-making method in a temperate and humid climate: Bwm-gis-fahp-gt. **Sustainable cities and society**, Elsevier, v. 79, p. 103641, 2022.

FARIAS, Diego Bispo dos Santos; ALTHOFF, Daniel; RODRIGUES, Lineu Neiva; FILGUEIRAS, Roberto. Performance evaluation of numerical and machine learning methods in estimating reference evapotranspiration in a Brazilian agricultural frontier. **Theoretical and Applied Climatology**, Springer, v. 142, n. 3, p. 1481–1492, 2020.

FAVARETO, Arilson; NAKAGAWA, Louise; KLEEB, Suzana; SEIFER, Paulo; PÓ, Marcos. Há mais pobreza e desigualdade do que bem estar e riqueza nos municípios do Matopiba. **Revista Nera**, n. 47, p. 348–381, 2019.

FAYET, Catherine M J; VERBURG, Peter H. Modelling opportunities of potential European abandoned farmland to contribute to environmental policy targets. **Catena**, Elsevier, v. 232, p. 107460, 2023.

FEIZIZADEH, Bakhtiar; BLASCHKE, Thomas. Land suitability analysis for tabriz county, iran: a multi-criteria evaluation approach using gis. **Journal of Environmental Planning and Management**, Taylor & Francis, v. 56, n. 1, p. 1–23, 2013.

FERNANDES, Bernardo Mançano; FREDERICO, Samuel; PEREIRA, Lorena Izá. Accumulation by land rent and territorial disputes in a brazilian agricultural frontier. In: **Agriculture, Environment and Development: International Perspectives on Water, Land and Politics**. [S.l.]: Springer, 2022. p. 231–263.

FERNANDES, Rafael Dreux Miranda; MELO, Diego Magalhães de; ELLI, Elvis Felipe; BATTISTI, Rafael. Climate change impacts on rainfed and irrigated soybean yield in brazil's new agricultural frontier. **Theoretical and Applied Climatology**, Springer, v. 147, n. 1, p. 803–816, 2022.

FERREIRA, Ana Beatriz de Freitas. **Impactos da expansão agrícola na vegetação do cerrado e recursos hídricos no oeste da Bahia até 2015**. 48 f. p. Dissertação (Monografia de Bacharelado em Engenharia Florestal) — Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

FERREIRA, Darlene A. de Oliveira. Geografia agrária no brasil: conceituação e periodização. **Terra livre**, n. 16, p. 39–70, 2001.

FETANAT, Abdolvahhab; TAYEBI, Mohsen; SHAFIPOUR, Gholamreza. Management of waste electrical and electronic equipment based on circular economy strategies: navigating a sustainability transition toward waste management sector. **Clean Technologies and Environmental Policy**, Springer, v. 23, p. 343–369, 2021.

FIGUEIREDO, Karoline; PIEROTT, Rodrigo; HAMMAD, Ahmed WA; HADDAD, Assed. Sustainable material choice for construction projects: A life cycle sustainability assessment framework based on bim and fuzzy-ahp. **Building and Environment**, Elsevier, v. 196, p. 107805, 2021.

FLORENCIO, Gabriel Wilson Lorena; MARTINS, Fabrina Bolzan; FAGUNDES, Flávia Fernanda Azevedo. Climate change on eucalyptus plantations and adaptive measures for sustainable forestry development across brazil. **Industrial Crops and Products**, Elsevier, v. 188, p. 115538, 2022.

FLORES, Noé Villegas; SALVADOR, Liliana Cristina Cruz; SANTOS, Ana Carolina Parapinski dos; MADERO, Yelinca Saldeño. A proposal to compare urban infrastructure using multi-criteria analysis. **Land Use Policy**, Elsevier, v. 101, p. 105173, 2021.

FREDERICO, Samuel; ALMEIDA, Marina Castro de. Escala geográfica e land grabbing: capital financeiro e grilagem de terras no Matopiba. **GEOUSP**, SciELO Brasil, v. 29, n. 1, p. e–222544, 2025.

FREITAS NETTO, Sebastião Vieira; SOBRAL, Marcos Felipe Falcão; RIBEIRO, Ana Regina Bezerra; SOARES, Gleibson Robert da Luz. Concepts and forms of greenwashing:

A systematic review. **Environmental Sciences Europe**, Springer, v. 32, n. 1, p. 19, 2020.

GMACH, Maria-Regina; DIAS, Bruno O; SILVA, Carlos A; NÓBREGA, Júlio CA; LUSTOSA-FILHO, José F; SIQUEIRA-NETO, Marcos. Soil organic matter dynamics and land-use change on Oxisols in the Cerrado, Brazil. **Geoderma regional**, Elsevier, v. 14, p. e00178, 2018.

GOMES, Cecília Siman. Impactos da expansão do agronegócio brasileiro na conservação dos recursos naturais. **Cadernos do Leste**, v. 19, n. 19, 2019.

GOMES, Luciene; SIMÕES, Silvio J C; FORTI, Maria C; OMETTO, Jean Pierre H B; NORA, Eloi L Dalla. Using geotechnology to estimate annual soil loss rate in the Brazilian Cerrado. **Journal of Geographic Information System**, Scientific Research Publishing, v. 9, n. 04, p. 420–439, 2017.

GOMES, Lucas Carvalho; CARDOSO, Irene Maria. Papel da agricultura familiar no sequestro de carbono e na adaptação às mudanças climáticas. **Ciência e Cultura**, Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, v. 73, n. 1, p. 40–43, 2021.

GORELICK, Noel; HANCHER, Matt; DIXON, Mike; ILYUSHCHENKO, Simon; THAU, David; MOORE, Rebecca. Google earth engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote sensing of Environment**, Elsevier, v. 202, p. 18–27, 2017.

GUO, Sen; ZHAO, Huiru. Optimal site selection of electric vehicle charging station by using fuzzy topsis based on sustainability perspective. **Applied Energy**, Elsevier, v. 158, p. 390–402, 2015.

GÜRLÜK, Serkan; UZEL, Gokhan. An evaluation of agri-environmental indicators through a multi-criteria decision-making tool in germany, france, the netherlands, and turkey. **Polish Journal of Environmental Studies**, HARD Publishing sc Jerzy Radecki, Hanna Radecka, v. 25, n. 4, p. 1523–1528, 2016.

HAESBAERT, Rogério. Concepções de território para entender a desterritorialização. In: HAESBAERT, Rogério (Ed.). **Território, territórios: ensaios sobre o ordenamento territorial**. Rio de Janeiro: Lamparina, 2011. p. 44–71.

HAILIANG, Zeng; KHOKHAR, Maryam; ISLAM, Tahir; SHARMA, Anshuman. A model for green-resilient supplier selection: fuzzy best–worst multi-criteria decision-making method and its applications. **Environmental Science and Pollution Research**, Springer, v. 30, n. 18, p. 54035–54058, 2023.

HARVEY, David. **O Novo Imperialismo**. 2. ed. São Paulo: Loyola, 2005.

HATAISHI, Laís; RODRIGUES, Bruna; TARTARI, Rodrigo. Análise espacial dos focos de calor e queimadas no parque nacional do araguaia, influências meteorológicas e seus efeitos sobre o ndvi. In: **Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Santos: [s.n.], 2019. p. 14–17.

HATZIOANNOU, Marianthi; KOKKINOS, Konstantinos. Evaluation of sustainability determinants of small farming systems via participatory modelling and fuzzy multi-criteria processes: The case study of heliciculture in greece. **Frontiers in Sustainability**, Frontiers Media SA, v. 2, p. 629408, 2021.

- HAYDAR, Sajjad. A system dynamics model and analytical hierarchy process: an integrated approach for achieving sustainable solid waste management system. **Environmental Science and Pollution Research**, Springer, p. 1–16, 2023.
- HELDENS, Stijn; SCLOCCO, Alessio; DREUNING, Henk; WERKHOVEN, Ben van; HIJMA, Pieter; MAASSEN, Jason; NIEUWPOORT, Rob V van. litstudy: A python package for literature reviews. **SoftwareX**, Elsevier, v. 20, p. 101207, 2022.
- HEZAM, Ibrahim M; GAMAL, Abduallah; ABDEL-BASSET, Mohamed; SALLAM, Karam. Facile and optimal evaluation model of intelligent waste collection systems based on the internet of things: a new approach toward sustainability. **Environment, Development and Sustainability**, Springer, p. 1–39, 2023.
- HONG, Changqiao; PRISHCHEPOV, Alexander V; JIN, Xiaobin; HAN, Bo; LIN, Jinhuang; LIU, Jingping; REN, Jie; ZHOU, Yinkang. The role of harmonized landsat sentinel-2 (HLS) products to reveal multiple trajectories and determinants of cropland abandonment in subtropical mountainous areas. **Journal of Environmental Management**, Elsevier, v. 336, p. 117621, 2023.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário 2017: Resultados Definitivos**. 2017. Disponível em: <[www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/21815-2017-censo-agropecuario.html](http://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/21815-2017-censo-agropecuario.html)>. Acesso em: 6 Nov. 2024.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2022: População residente, Variação absoluta de população residente e Taxa de crescimento geométrico**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Dados do SIDRA, Tabela 4709. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/4709>>. Acesso em: 6 Nov. 2024.
- INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Dados de Declividade do TOPOdata**. 2015. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>>. Acesso em: 6 Ago. 2024.
- IPEA, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Agenda 2030: objetivos de desenvolvimento sustentável: avaliação do progresso das principais metas globais para o Brasil: ODS 2: fome zero e agricultura sustentável**. Brasília: Ipea, 2024. 23 p. Cadernos ODS, 2. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.38116/ri2024ODS2>>. Acesso em: 4 Ago. 2025.
- ISHIZAKA, Alessio; NEMERY, Philippe. **Multi-criteria decision analysis: methods and software**. England: John Wiley & Sons, 2013.
- JANG, Jyh-Shing Roger; SUN, Chuen-Tsai; MIZUTANI, Eiji. **Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1997.
- JASTI, Pradeep Chaitanya; RAM, V Vinayaka. Integrated and sustainable benchmarking of metro rail system using analytic hierarchy process and fuzzy logic: A case study of mumbai. **Urban Rail Transit**, Springer, v. 5, n. 3, p. 155–171, 2019.
- JEON, Christy Mihyeon; AMEKUDZI, Adjo A; GUENSLER, Randall L. Evaluating plan alternatives for transportation system sustainability: Atlanta metropolitan region.

**International Journal of Sustainable Transportation**, Taylor & Francis, v. 4, n. 4, p. 227–247, 2010.

JESUS, Priscila Barbosa de; ALMEIDA, Maria Geralda de. Conflitos e disputas pela terra e pela água:: Os povos geraizeiros de Correntina-ba ea expansão do agronegócio no cerrado do Matopiba. **Geosaberes: Revista de Estudos Geoeducacionais**, Universidade Federal do Ceará, v. 13, n. 1, p. 40–54, 2022.

JONG, Peter de; SPRENGER, C; VEEN, Frans van. On extreme values of moran's i and geary's c. **Geographical Analysis**, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 16, n. 1, p. 17–24, 1984. doi: 10.1111/j.1538-4632.1984.tb00797.x.

JORGE-GARCÍA, David; ESTRUCH-GUITART, Vicente; ARAGONÉS-BELTRÁN, Pablo. How geographical factors and decision-makers' perceptions influence the prioritization of ecosystem services: Analysis in the spanish rice field areas in ramsar mediterranean wetlands. **Science of The Total Environment**, Elsevier, v. 869, p. 161823, 2023.

JOVANOVIC, Marina; TURANJANIN, Valentina; BAKIC, Vukman; PEZO, Milada; VUCICEVIC, Biljana. Sustainability estimation of energy system options that use gas and renewable resources for domestic hot water production. **Energy**, Elsevier, v. 36, n. 4, p. 2169–2175, 2011.

JR, Carlos M Souza; SHIMBO, Julia Z.; ROSA, Marcos R; PARENTE, Leandro L *et al.* Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with landsat archive and earth engine. **Remote Sensing**, MDPI, v. 12, n. 17, p. 2735, 2020.

KAGEYAMA, Alberto. A questão agrária brasileira: interpretações clássicas. **Reforma Agrária**, v. 23, n. 3, p. 5–16, 1993.

KAMALI, Mohammadreza; COSTA, Maria Elisabete; AMINABHAVI, Tejraj M; CAPELA, Isabel. Sustainability of treatment technologies for industrial biowastes effluents. **Chemical Engineering Journal**, Elsevier, v. 370, p. 1511–1521, 2019.

KELLNER, Florian; UTZ, Sebastian. Sustainability in supplier selection and order allocation: Combining integer variables with markowitz portfolio theory. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 214, p. 462–474, 2019.

KESHAVARZ-GHORABAEE, Mehdi; AMIRI, Maghsoud; HASHEMI-TABATABAEI, Mohammad; GHAHREMANLOO, Mohammad. Sustainable public transportation evaluation using a novel hybrid method based on fuzzy bwm and mabac. **The Open Transportation Journal**, v. 15, n. 1, 2021.

KESHAVARZ-GHORABAEE, Mehdi; GOVINDAN, Kannan; AMIRI, Maghsoud; ZAVADSKAS, Edmundas Kazimieras; ANTUCHEVICIENE, Jurgita. An integrated type-2 fuzzy decision model based on waspas and seca for evaluation of sustainable manufacturing strategies. **Journal of Environmental Engineering and Landscape Management**, Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas Leidykla Technika, v. 27, n. 4, p. 187–200, 2019.

KHAN, Feroz; ALI, Yousaf. A facilitating framework for a developing country to adopt smart waste management in the context of circular economy. **Environmental Science and Pollution Research**, Springer, v. 29, n. 18, p. 26336–26351, 2022.

- KITCHENHAM, Barbara; CHARTERS, Stuart. **Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering**. Keele and Durham, 2007.
- KOSMAS, C; KAIRIS, O; KARAVITIS, C; ACIKALIN, S; ALCALÁ, M; ALFAMA, P; ATLHOPHENG, J; BARRERA, J; BELGACEM, A; SOLÉ-BENET, A *et al.* An exploratory analysis of land abandonment drivers in areas prone to desertification. **Catena**, Elsevier, v. 128, p. 252–261, 2015.
- KUMAR, Aalok; ANBANANDAM, Ramesh. Environmentally responsible freight transport service providers' assessment under data-driven information uncertainty. **Journal of Enterprise Information Management**, Emerald Publishing Limited, v. 34, n. 1, p. 506–542, 2020.
- LASANTA, Teodoro; ARNÁEZ, Jose; PASCUAL, N; RUIZ-FLAÑO, Purificación; ERREA, MP; LANA-RENAULT, N. Space-time process and drivers of land abandonment in Europe. **Catena**, Elsevier, v. 149, p. 810–823, 2017.
- LATINOPOULOS, Dionysis. Multicriteria decision-making for efficient water and land resources allocation in irrigated agriculture. **Environment, Development and Sustainability**, Springer, v. 11, p. 329–343, 2009.
- LI, Shuzhen; XIAO, Jing; LEI, Xiaoyan; WANG, Yahui. Farmland abandonment in the mountainous areas from an ecological restoration perspective: A case study of chongqing, china. **Ecological Indicators**, Elsevier, v. 153, p. 110412, 2023.
- LI, Shuang; XU, Liang; JING, Yinghong; YIN, Hang; LI, Xinghua; GUAN, Xiaobin. High-quality vegetation index product generation: A review of ndvi time series reconstruction techniques. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Elsevier, v. 105, p. 102640, 2021.
- LIBÓRIO, Matheus P; MARTINS, Carlos Augusto PS; LAUDARES, Sandro; EKEL, Petr I. Method of preparing an international and national literature review for novice researchers. **MethodsX**, Elsevier, p. 102165, 2023.
- LOCATELLI, Jorge L; SANTOS, Rafael S; CHERUBIN, Maurício R; CERRI, Carlos EP. Changes in soil organic matter fractions induced by cropland and pasture expansion in Brazil's new agricultural frontier. **Geoderma Regional**, Elsevier, v. 28, p. e00474, 2022.
- LOMBARDI, Patrizia. Evaluation of sustainable urban redevelopment scenarios. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Urban Design and Planning**, Thomas Telford Ltd, v. 162, n. 4, p. 179–186, 2009.
- LOPES, Clarissa Gomes Reis; FERRAZ, Elba Maria Nogueira; CASTRO, Cibele Cardoso de; LIMA, Elifábia Neves de; SANTOS, Josiene Maria Falcão Fraga dos; SANTOS, Danielle Melo dos; ARAÚJO, Elcida de Lima. Forest succession and distance from preserved patches in the Brazilian semiarid region. **Forest Ecology and Management**, Elsevier, v. 271, p. 115–123, 2012.
- LOPES, Rodrigo Barbosa Sellos; SOUZA, Olíria Morgana Menezes; de Moura Andrade, André; de Siqueira, Guilherme Benko; COLLICCHIO, Erich. Potential effects of future climatic scenarios on the agroclimatic aptitude of eucalyptus urophylla in the Matopiba region. In: **Agroenergy**. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2024, (Woodhead Series in Bioenergy, 1). p. 115–128.

LUMBRERAS, José Francisco; FILHO, Amaury Carvalho; MOTTA, Paulo Emilio Ferreira; BARROS, Alexandre Hugo Cesar; AGLIO, Mario Luiz Diamante; DART, Ricardo Oliveira. Potencialidades e limitações ao uso agrícola de solos do Matopiba. In: SBCS. **Anais do XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. O solo e suas múltiplas funções**. Natal, 2015.

LUMBRERAS, José Francisco; FILHO, Amaury de Carvalho; MOTTA, Paulo Emilio Ferreira da; BARROS, Alexandre Hugo Cesar; AGLIO, Mario Luiz Diamante; DART, Ricardo Oliveira; SILVEIRA, Hilton Luis Ferraz da; QUARTAROLI, Carlos Fernando; ALMEIDA, Rodrigo Estevam Munhoz de; FREITAS, Pedro Luiz de. **Aptidão agrícola das terras do Matopiba**. Rio de Janeiro, 2015. 48 p. (Embrapa Solos. Documentos, 179). Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1025303>>. Acesso em: 19 Nov. 2024.

LUO, Dong; CALDAS, Marcellus M; YANG, Huichen. Deep learning models to map an agricultural expansion area with modis and sentinel-2 time series images. **Journal of Applied Remote Sensing**, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, v. 16, n. 4, p. 046508–046508, 2022.

MA, Wenbin; DU, Yanlian; ZHANG, Kairui; SHEN, Yijun. Application of multi-criteria decision making to sustainable deep-sea mining vertical transport plans. **Frontiers in Marine Science**, Frontiers, v. 9, p. 1009834, 2022.

MAGALHÃES, Luciola Alves; MIRANDA, Evaristo Eduardo De. **MATOPIBA: Quadro Natural**. [S.l.]: Campinas: Embrapa, 2014.

MALAGODI, Edgard. Por que a questão agrária é uma questão da agricultura de base familiar e camponesa? In: Ministério do Desenvolvimento Agrário (Ed.). **Agricultura Familiar Brasileira: Desafios e Perspectivas de Futuro**. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Agrário, 2017. p. 42–64.

MALCZEWSKI, Jacek. **GIS and multicriteria decision analysis**. New York: John Wiley & Sons, 1999.

MALCZEWSKI, Jacek. Gis-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. **International journal of geographical information science**, Taylor & Francis, v. 20, n. 7, p. 703–726, 2006.

MAPA, Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Brasil Projeções do agronegócio 2015/2016 a 2025/2026**. Brasília-DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento Brasília-DF, Brazil, 2016.

MAPBIOMAS. **Coleção 7.1 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil**. 2021. Disponível em: <<https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas>>. Acesso em: 6 Ago. 2024.

MAPBIOMAS. **Coleção 3 da série mensal de Mapas de Cicatriz de Fogo do Brasil**. 2022. <[https://projects/mapbiomas-public/assets/brazil/fire/monitor/mapbiomas\\_fire\\_monthly\\_burned\\_v1](https://projects/mapbiomas-public/assets/brazil/fire/monitor/mapbiomas_fire_monthly_burned_v1)>. Acesso em: 14 Maio 2025.

MAPBIOMAS. **Coleção 2 da série anual de Mapas de Carbono no Solo do Brasil**. 2023. <<https://mapbiomas.org/colecao-2-carbono-no-solo>>. Acesso em: 9 Julh. 2025.

MASSEI, Gianluca; ROCCHI, Lucia; PAOLOTTI, Luisa; GRECO, Salvatore; BOGGIA, Antonio. Decision support systems for environmental management: A case study on wastewater from agriculture. **Journal of Environmental Management**, Elsevier, v. 146, p. 491–504, 2014.

MATOS, Paulo Ferreira; PESSOA, Vera Lúcia Salazar. A modernização da agricultura no brasil e os novos usos do território. **Geo Uerj**, v. 2, n. 22, p. 290–322, 2011.

MATRICARDI, Eraldo Aparecido T.; MENDES, Thais Jacob; PEREIRA, Eder Miguel; VASCONCELOS, Pedro Guilherme de A.; ÂNGELO, Humberto; COSTA, Olívia B. da. Land use and land cover dynamic in the MATOPIBA region between 2000 and 2016. **Nativa: Pesquisas Agrárias e Ambientais**, Mato Grosso Federal University, v. 7, n. 5, p. 547–555, 2019.

MENDES, Bruno da Rocha; SIMÕES, Maria; BENITES, Vinicius de Melo; COSTA, Roberta de Oliveira. O potencial da recuperação de pastagens degradadas no cerrado do MATOPIBA. **Revista Caderno Pedagógico**, v. 12, n. 8, p. 01–19, 2024.

MENDES, Cristiano; GONÇALVES, Jéssica Rúbia. Segurança e soberania alimentar: o caso brasileiro (1994-2015). **Caderno CRH**, SciELO Brasil, v. 36, p. e023009, 2023.

MENDOZA, Guillermo A; PRABHU, Ravi. Multiple criteria decision making approaches to assessing forest sustainability using criteria and indicators: a case study. **Forest ecology and management**, Elsevier, v. 131, n. 1-3, p. 107–126, 2000.

MENON, Rakesh R; RAVI, V. Using ahp-topsis methodologies in the selection of sustainable suppliers in an electronics supply chain. **Cleaner Materials**, Elsevier, v. 5, p. 100130, 2022.

MILARE, Gisele; GIAROLLA, Angélica; ESCADA, Maria Isabel Sobral. Indicador de suscetibilidade à queimada aplicado aos projetos de assentamento da região do Matopiba. In: **XXIV Brazilian Symposium on Geoinformatics - GEOINFO 2023, São José dos Campos, SP, Brazil, December 4-6, 2023**. MCTI/INPE, 2023. p. 436–441. Disponível em: <<http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGPDW34P/4ADCR2L?ibiurl.backgroundlanguage=en>>. Acesso em: 4 Jan. 2024.

MIRALHA, Wagner. Questão agrária brasileira: origem, necessidade e perspectivas de reforma hoje. **Revista NERA**, Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente (UNESP), v. 9, n. 8, p. 151–172, 2006.

MIRANDA, Evaristo Eduardo; CARVALHO, Carlos Alberto de; MARTINHO, Paulo Roberto Rodrigues. Intensificação produtiva da agricultura e regularização ambiental: encontros e desencontros territoriais entre o censo agropecuário e o cadastro ambiental rural. In: NAVARRO, Zadi (Ed.). **A economia agropecuária do Brasil: a grande transformação**. São Paulo: Baraúna, 2020. p. 42–101. ISBN 978-65-87278-26-1. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1127561>>. Acesso em: 10 Jan 2024.

MOHAMADZADEH, Parviz; POURMORADIAN, Samereh; FEIZIZADEH, Bakhtiar; SHARIFI, Ayyoob; VOGDRUP-SCHMIDT, Mathias. A gis-based approach for spatially-explicit sustainable development assessments in east azerbaijan province, iran. **Sustainability**, MDPI, v. 12, n. 24, p. 10413, 2020.

MOISA, Mitiku Badasa; MERGA, Biratu Bobo; GABISSA, Bacha Temesgen; GEMEDA, Dessalegn Obsi. Assessment of land suitability for oilseeds crops (sesame and groundnut) using geospatial techniques: In the case of diga district, east wollega zone, western ethiopia. **Oil Crop Science**, Elsevier, v. 7, n. 3, p. 127–134, 2022.

MONDARDO, Marcos Leandro; AZEVEDO, José Roberto Nunes de. Matopiba: Do domínio da terra e abuso da água aos territórios de resistências das populações tradicionais. **Revista Nera**, n. 47, p. 296–320, 2019.

MONTEIRO NETO, Aristides; COLOMBO, Luciléia Aparecida; NETO, João Mendes da Rocha. **Políticas territoriais em tempos de múltiplas crises: desafios e perspectivas para o Brasil na década de 2020**. Brasília, DF, Brasil, 2023. Disponível em: <<https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/11813>>. Acesso em: 4 Julh. 2024.

MOR, Deepali; RAMACHANDRAN, M. Optimization of solid wastes disposal strategy by fuzzy topsis method. **Nature Environment and Pollution Technology**, Technoscience Publications, v. 16, n. 1, p. 247, 2017.

MORAN, Patrick AP. Notes on continuous stochastic phenomena. **Biometrika**, JSTOR, v. 37, n. 1/2, p. 17–23, 1950. doi: 10.2307/2332142.

MOREIRA, Ruy. O espaço e o contra-espaço: as dimensões territoriais da sociedade civil e do estado, do privado e do público na ordem espacial burguesa. In: HAESBAERT, Rogério (Ed.). **Território, territórios: ensaios sobre o ordenamento territorial**. Rio de Janeiro: Lamparina, 2011. p. 72–108.

MOZAFFARI, Mehdi; BEMANI, Akram; ERFANI, Malihe; YARAMI, Najmeh; SIYAHATI, Gholamreza. Integration of lcsa and gis-based mcdm for sustainable landfill site selection: A case study. **Environmental monitoring and assessment**, Springer, v. 195, n. 4, p. 510, 2023.

MUSAKWA, Walter. Identifying land suitable for agricultural land reform using gis-mcda in south africa. **Environment, Development and Sustainability**, Springer, v. 20, n. 5, p. 2281–2299, 2018.

NEPOMOCENO, Taiane Aparecida Ribeiro; CARNIATTO, Irene. A nova fronteira agrícola do brasil: um ensaio teórico sobre a insustentabilidade na região do Matopiba. **Revista Cerrados (Unimontes)**, Universidade Estadual de Montes Claros, v. 20, n. 01, p. 95–119, 2022.

NEVES, Laís Fernandes de Souza; MARIMON, Beatriz Schwantes; ANDERSON, Liana Oighenstein; NEVES, Sandra Mara Alves da Silva. Dinâmica de fogo no parque estadual do araguaia, zona de transição amazônia-cerrado. **Ra'e Ga**, v. 44, 2018.

NOOJIPADY, Praveen; MORTON, C Douglas; MACEDO, N Marcia; VICTORIA, C Daniel; HUANG, Chengquan; GIBBS, K Holly; BOLFE, L Edson. Forest carbon emissions from cropland expansion in the Brazilian Cerrado biome. **Environmental Research Letters**, IOP Publishing, v. 12, n. 2, p. 025004, 2017.

OLIVEIRA, Ariovaldo Umbelino De. **A mundialização da agricultura brasileira**. São Paulo: Iande Editorial, 2016. v. 1. 545 p. ISBN 978-85-7506-145-9.

ONU, Organizações das Nações Unidas. **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: Brasil, 2016. Disponível em: <[https://www.mds.gov.br/webarquivos/publicacao/Brasil\\_Amigo\\_Pesso\\_Idosa/Agenda2030.pdf](https://www.mds.gov.br/webarquivos/publicacao/Brasil_Amigo_Pesso_Idosa/Agenda2030.pdf)>. Acesso em: 13 Nov. 2024.

OPON, Joel; HENRY, Michael. A multicriteria analytical framework for sustainability evaluation under methodological uncertainties. **Environmental Impact Assessment Review**, Elsevier, v. 83, p. 106403, 2020.

OSSES, U; ROJÍ, E; CUADRADO, J; LARRAURI, M. Multiple-criteria decision-making tool for local governments to evaluate the global and local sustainability of transportation systems in urban areas: case study. **Journal of Urban Planning and Development**, American Society of Civil Engineers, v. 144, n. 1, p. 04017019, 2018.

OVIEDO-GARCÍA, M Ángeles. Journal citation reports and the definition of a predatory journal: The case of the multidisciplinary digital publishing institute. **Research Evaluation**, Oxford University Press, v. 30, n. 3, p. 405–419a, 2021.

PACHECO, Admilson Penha; JÚNIOR, Juarez Antonio da Silva; FILHO, Fernando Dacal Reis; SILVA, Tácito Richarles Ferreira da. Sensoriamento remoto por radar aplicado ao estudo dos recursos hídricos: Uma análise bibliométrica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 17, p. 4409–4421, 2024.

PASSONI, Chiara; MARINI, Alessandra; BELLERI, Andrea; MENNA, Costantino. Redefining the concept of sustainable renovation of buildings: State of the art and an Ict-based design framework. **Sustainable Cities and Society**, Elsevier, v. 64, p. 102519, 2021.

PAULINO, Eliane Tomiasi. Geografia agrária e questão agrária. In: FERNANDES, Bernardo Mançano; MARQUES, Marta Inez Medeiros; SUZUKI, Júlio Cesar (Ed.). **Geografia Agrária: Teoria e Poder**. 1. ed. São Paulo: Expressão Popular, 2007. p. 339–351.

PEREIRA, Lorena Izá; ORIGUÉLA, Camila Ferracini; COCA, Estevan Leopoldo de Freitas. A política agrária no governo bolsonaro: As contradições entre a expansão do agronegócio, o avanço da fome e o antiambientalismo. **Revista Nera**, n. 58, p. 8–27, 2021.

PEREIRA, Lorena Izá; PAULI, Lucas. O processo de estrangeirização da terra e expansão do agronegócio na região do Matopiba. **Revista Campo-Território**, Uberlândia, v. 11, n. 23 Jul., set. 2016.

PEREIRA, Lorena Izá; PAULI, Lucas. Matopiba: Controle do território e expansão da fronteira da estrangeirização da terra/matopiba: control of the territory and expansion of the frontier of land foreignization/matopiba: control del territorio y expansión de la frontera de la extranjerización de la tierra. **Revista NERA**, n. 47, p. 148–172, 2019.

PIRES, Mauro Oliveira. Programas agrícolas na ocupação do cerrado. **Sociedade e cultura**, Universidade Federal de Goiás, v. 3, n. 1-2, p. 111–131, 2000.

PLETSCH, Mikhaela AJS; KÖRTING, Thales S; MORITA, Felipe C; SILVA-JUNIOR, Celso HL; ANDERSON, Liana O; ARAGÃO, Luiz EOC. Near real-time fire detection and monitoring in the matopiba region, brazil. **Remote Sensing**, MDPI, v. 14, n. 13, p. 3141, 2022.

POLIZEL, Silvia Palotti; VIEIRA, Rita Marcia Silva Pinto; POMPEU, João; FERREIRA, Yara da Cruz; SOUSA-NETO, Eráclito Rodrigues de; BARBOSA, Alexandre Augusto; OMETTO, Jean Pierre Henry Balbaud. 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**, Elsevier, v. 109, p. 105713, 2021.

PORTO-GONÇALVES, Carlos Walter. **O Desafio do Conhecimento: natureza e cultura na América Latina**. Petrópolis: Vozes, 2004.

POUSA, Raphael; COSTA, Marcos Heil; PIMENTA, Fernando Martins; FONTES, Vitor Cunha; BRITO, Vinícius Fonseca Anício de; CASTRO, Marina. Climate change and intense irrigation growth in western bahia, brazil: The urgent need for hydroclimatic monitoring. **Water**, MDPI, v. 11, n. 5, p. 933, 2019.

PRUDENCIO-VÁZQUEZ, Jaime A; MARTÍNEZ-RODRÍGUEZ, Alvaro; PÉREZ-VICTORINO, Leonardo; ÁLVAREZ-GARCÍA, José. Spatial patterns on tourism establishments in five CIP's in Mexico, 2010–2022. **Quality & Quantity**, Springer, p. 1–18, 2023. doi: 10.1007/s11135-023-01750-4.

QURESHI, Mohamed Rafik N; SINGH, Ram Karan; HASAN, Mohd Abul. Decision support model to select crop pattern for sustainable agricultural practices using fuzzy mcdm. **Environment, development and sustainability**, Springer, v. 20, p. 641–659, 2018.

RAFIGH, Parisa; AKBARI, Ali Akbar; BIDHANDI, Hadi Mohammadi; KASHAN, Ali Husseinzadeh. Sustainable closed-loop supply chain network under uncertainty: a response to the covid-19 pandemic. **Environmental Science and Pollution Research**, Springer, p. 1–17, 2021.

RAHIMI, Saleheh; HAFEZALKOTOB, Ashkan; MONAVARI, Seyed Masoud; HAFEZALKOTOB, Arian; RAHIMI, Razieh. Sustainable landfill site selection for municipal solid waste based on a hybrid decision-making approach: Fuzzy group bwm-multimoora-gis. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 248, p. 119186, 2020.

RAMALHO FILHO, Antonio; BEEK, Klaas Jan. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPQ, 1995.

REIG, E; AZNAR, J; ESTRUCH, Vicente. A comparative analysis of the sustainability of rice cultivation technologies using the analytic network process. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 8, n. 2, p. 273–284, 2010.

REIS, Júlio César Dos; RODRIGUES, Geraldo Stachetti; BARROS, Inácio De; RODRIGUES, Renato de Aragão Ribeiro; GARRETT, Rachael D; VALENTIM, Judson Ferreira; KAMOI, Mariana YT; MICHETTI, Miqueias; WRUCK, Flávio Jesus; RODRIGUES-FILHO, Saulo. Fuzzy logic indicators for the assessment of farming sustainability strategies in a tropical agricultural frontier. **Agronomy for Sustainable Development**, Springer, v. 43, n. 1, p. 8, 2023.

REIS, Layara Campelo Dos; SILVA, Claudio Moises Santos E; BEZERRA, Bergson Guedes; MUTTI, Pedro Rodrigues; SPYRIDES, Maria Helena Constantino; SILVA, Pollyanne Evangelista Da. Analysis of climate extreme indices in the MATOPIBA region, Brazil. **Pure and Applied Geophysics**, Springer, v. 177, p. 4457–4478, 2020.

REN, Jingzheng; LIANG, Hanwei. Multi-criteria group decision-making based sustainability measurement of wastewater treatment processes. **Environmental Impact Assessment Review**, Elsevier, v. 65, p. 91–99, 2017.

REN, Jingzheng; LÜTZEN, Marie. Fuzzy multi-criteria decision-making method for technology selection for emissions reduction from shipping under uncertainties. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, Elsevier, v. 40, p. 43–60, 2015.

RIBEIRO, Mílvio da Silva; NAHUM, João Santos. A pecuária como frente de expansão no médio rio tocantins: análise do período de 1970 a 1980. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, v. 21, n. 3, p. 1699–1717, May 2023.

ROCHA, Abimael Carvalho da. **Estratégias do capital no cerrado: reestruturação agrícola no Triângulo Mineiro**. Dissertação (Mestrado em Geografia) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil, 2025. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/44884>>.

ROCHA, Máira Iaê Savioli; NASCIMENTO, Diego Tarley Ferreira. Distribuição espaço-temporal das queimadas no bioma cerrado (1999/2018) e sua ocorrência conforme os diferentes tipos de cobertura e uso do solo. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 3, p. 1220–1235, 2021.

RODRIGUES, ML; KÖRTING, TS; QUEIROZ, GR de; SALES, CP; SILVA, LAR da. Detecting center pivots in Matopiba using hough transform and web time series service. In: IEEE. **2020 IEEE Latin American GRSS & ISPRS Remote Sensing Conference (LAGIRS)**. Santiago-Chile, 2020. p. 189–194.

ROSTAMZADEH, Reza; GHORABAEI, Mehdi Keshavarz; GOVINDAN, Kannan; ESMAEILI, Ahmad; NOBAR, Hossein Bodaghi Khajeh. Evaluation of sustainable supply chain risk management using an integrated fuzzy topsis-critic approach. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 175, p. 651–669, 2018.

ROUSE JR, John W; HAAS, R Hect; SCHELL, JA; DEERING, DW. **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation**. Texas, 1973.

RUFINO, Dayseana Carneiro; NETO, Manoel Alexandre Diniz; MELO, Thiago de Sousa; BANDEIRA, Lucas Borchart; SILVA, Márcia Daniele Pereira da; BULHÕES, Leandro Antônio de; DINIZ, Belísia Lúcia Moreira Toscano; MESQUITA, Evandro Franklin de. Estoque de carbono do solo em agroecossistemas e vegetação secundária. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 11, p. e545111133840, 2022.

RYLANDS, Anthony B; BRANDON, Katrina. Unidades de conservação brasileiras. **Megadiversidade**, v. 1, n. 1, p. 27–35, 2005.

SAATY, Thomas L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of mathematical psychology**, Elsevier, v. 15, n. 3, p. 234–281, 1977.

SALVADOR, Mozar de A; BRITO, JIB de de. Trend of annual temperature and frequency of extreme events in the matopiba region of brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, Springer, v. 133, p. 253–261, 2018.

SAMBUICHI, Regina Helena Rosa; SILVA, Ana Paula Moreira da; OLIVEIRA, Michel Angelo Constantino de; SAVIAN, Moisés. **Políticas agroambientais e sustentabilidade: desafios, oportunidades e lições aprendidas**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2014.

SANTANA, Carlos Augusto Mattos; CAMPOS, Silvia Kanadani; MARRA, Renner; ARAGÃO, Adalberto Araújo. Cerrado: pilar da agricultura brasileira. In: **Dinâmica agrícola no cerrado: análises e projeções**. Brasília, DF: Embrapa, 2020. p. 39–58.

SANTANA, Jéssica Cauana de Oliveira; SIMON, Marcelo Fragomeni. Plant diversity conservation in an agricultural frontier in the brazilian cerrado. **Biodiversity and Conservation**, Springer, v. 31, n. 2, p. 667–681, 2022.

SANTOS, José Yure Gomes dos; QUEIR, Rafael. Efeitos das alterações no uso e ocupação do solo nas perdas de solo da bacia do rio de janeiro, oeste da bahia. **Boletim Goiano De Geografia**, v. 41, n. 1, 2021.

SANTOS, Laís Freitas dos; CERQUEIRA, Cristiane Aparecida de; FERRAZ, Marcelo Inácio Ferreira; JESUS, Clésio Marcelino de. Atividades produtivas e estrutura fundiária da região do maranhão, tocantins, piauí e bahia (Matopiba) em 2006 e 2017. In: **Anais da SOBER – Sociedade Brasileira de Estudos Rurais e Agroindustriais (SobereBPC 2021)**. [s.n.], 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.29327/soberebpc2021.343699>>.

SANTOS, Laís Freitas dos; CERQUEIRA, Cristiane Aparecida de; FERRAZ, Marcelo Inácio Ferreira; JESUS, Clesio Marcelino de. Estrutura fundiária do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia (Matopiba): O índice de gini terras nos anos 2000. **Caminhos de Geografia**, v. 24, n. 92, p. 42–56, abr. 2023.

SANTOS, Laís Freitas dos; CERQUEIRA, Cristiane Aparecida de; FERRAZ, Marcelo Inácio Ferreira; JESUS, Clesio Marcelino de. Padrões espaciais da produção agropecuária no Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia (Matopiba). **COLÓQUIO-Revista do Desenvolvimento Regional**, v. 21, n. 3, jul./set., p. 226–251, 2024.

SANTOS, Laís Freitas dos; RUCHKYS, Úrsula de Azevedo. A geospatial insight into farmland abandonment in Matopiba: the emerging frontier of Brazilian agriculture. **Regional Environmental Change**, Springer, v. 25, n. 2, p. 66, 2025.

SANTOS, Milton. **Por uma outra globalização**. [S.l.]: Record, 2023.

SANTOS, Rafael S; WIESMEIER, Martin; OLIVEIRA, Dener MS; LOCATELLI, Jorge L; BARRETO, Matheus SC; DEMATTE, Jose AM; CERRI, Carlos EP. Conversion of brazilian savannah to agricultural land affects quantity and quality of labile soil organic matter. **Geoderma**, Elsevier, v. 406, p. 115509, 2022.

SANTOYO-CASTELAZO, Edgar; AZAPAGIC, Adisa. Sustainability assessment of energy systems: integrating environmental, economic and social aspects. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 80, p. 119–138, 2014.

SARI, Fatih. Forest fire susceptibility mapping via multi-criteria decision analysis techniques for mugla, turkey: A comparative analysis of vikor and topsis. **Forest Ecology and Management**, Elsevier, v. 480, p. 118644, 2021.

SARKIS, Joseph. Making a sustainability business case for alternative building designs using the leed requirements. **Journal of Green Building**, College Publishing, v. 1, n. 4, p. 58–66, 2006.

SAUER, Sérgio. Demanda mundial por terras: “land grabbing” ou oportunidade de negócios no brasil? **Revista de Estudos e Pesquisas sobre as Américas**, v. 4, n. 1, 2010.

SAUER, Sérgio; LEITE, Alice Zago. Medida provisória 759: descaminhos da reforma agrária e legalização da grilagem de terras no brasil. **Retratos de Assentamentos**, v. 20, n. 1, p. 14–40, 2017.

SAVIAN, Moisés; MILHOMENS, Allan; VALESE, Marilúcia Canisso; CABRAL, Paulo Guilherme. Cadastro ambiental rural: experiências e potencialidades para a gestão agroambiental. **Políticas agroambientales y sostenibilidad: desafíos, oportunidades y lecciones aprendidas**. Brasília: IPEA, p. 105–124, 2014.

SAXENA, Prateek; PAGONE, Emanuele; SALONITIS, Konstantinos; JOLLY, Mark R. Sustainability metrics for rapid manufacturing of the sand casting moulds: A multi-criteria decision-making algorithm-based approach. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 311, p. 127506, 2021.

SCHIESARI, Luis; WAICHMAN, Andrea; BROCK, Theo; ADAMS, Cristina; GRILLITSCH, Britta. Pesticide use and biodiversity conservation in the Amazonian agricultural frontier. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, The Royal Society, v. 368, n. 1619, p. 20120378, 2013.

SECAF, Beatriz Stuart. Cop-21: O acordo de paris. **Agroanalysis**, v. 36, n. 1, p. 34–35, 2016.

SHARMA, Rachit Kumar; SINGH, Prashant Kumar; SARKAR, Prabir; SINGH, Harpreet. A hybrid multi-criteria decision approach to analyze key factors affecting sustainability in supply chain networks of manufacturing organizations. **Clean Technologies and Environmental Policy**, Springer, v. 22, p. 1871–1889, 2020.

SILVA, Carlos Alberto Franco da. Fronteira agrícola capitalista e ordenamento territorial. In: SANTOS, Milton; OUTROS (Ed.). **Território, territórios: ensaios sobre o ordenamento territorial**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Lamparina, 2006. p. 282–312.

SILVA, Izaias de Souza; EVANGELISTA, Jaqueline Pereira; MELO, Sandro Cristiano de. Os impactos da agricultura moderna no cerrado mato-grossense: Um estudo de caso do município de primavera do leste-mt. **Revista Geoaraguaia**, v. 11, n. 02, p. 235–250, 2021.

SILVA, Josué G. da; STOLCKE, Verena. **O que é questão agrária**. 4. ed. São Paulo: Brasiliense, 1981. (Primeiros Passos).

SILVA, Luan Guilherme. **Mercado da fome: Um estudo sobre o sistema alimentar global**. 51 f. p. Trabalho de Conclusão de Curso — Graduação em Relações Internacionais, Uberlândia, 2019.

SILVA, Livia Maria Leite. **Modelos e Métodos para Análise Multicritério e Tomada de Decisão Espacial em Ambiente de Incertezas e Suas Aplicações**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, 2020.

SILVA, Luciele Vaz da; CASAROLI, Derblai; EVANGELISTA, Adão Wagner Pêgo; JÚNIOR, José Alves; BATTISTI, Rafael. Rainfall intensity-duration-frequency relationships for risk analysis in the region of Matopiba, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, SciELO Brasil, v. 34, p. 247–254, 2019.

SILVA, P.S.; RODRIGUES, J.A.; SANTOS, F.L.M.; PEREIRA, A.A.; NOGUEIRA, J.; DACAMARA, C.C.; LIBONATI, R. Drivers of burned area patterns in Cerrado: The case of Matopiba region. In: **2020 IEEE Latin American GRSS & ISPRS Remote Sensing Conference (LAGIRS)**. [S.l.: s.n.], 2020. p. 542–547.

SILVA, Vanessa Cecília Benavides. SIG na análise ambiental: susceptibilidade erosiva da bacia hidrográfica do córrego mutuca, nova lima, minas gerais. **Revista de Geografia**, v. 31, n. 2, 2014.

SILVA, Vicente de Paulo Rodrigues da; SILVA, Roberta Araújo; MACIEL, Girlene Figueiredo; BRAGA, Célia Campos; JÚNIOR, José Luiz Cabral da Silva; SOUZA, Enio Pereira de; ALMEIDA, Rafaela Silveira Rodrigues; SILVA, Madson Tavares; HOLANDA, Romildo Morant de. Calibração e validação do modelo aquacrop para a cultura de soja cultivada mediante diferentes níveis de irrigação na região de Matopiba, brasil. **Ciência Rural**, v. 48, n. 1, 2018.

SINGH, Ram Karan; MALLICK, Javed. Fuzzy based multi-criteria method for sustainable green chamber farming practices. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, v. 89, n. 10, p. 1732–1736, 2019.

SINHA, Amit Kumar; ANAND, Ankush. Development of sustainable supplier selection index for new product development using multi criteria decision making. **Journal of cleaner production**, Elsevier, v. 197, p. 1587–1596, 2018.

SOUZA, Lucian Maschio de; JUNIOR, Francisco Rodrigues Lima; SOUZA, Andrea; PUGLIERI, Fábio Neves. Proposal of a hesitant fuzzy linguistic topsis model for supplier sustainability evaluation. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 18, n. 3, p. e04474–e04474, 2024.

SPERA, Stephanie A; GALFORD, Gillian L; COE, Michael T; MACEDO, Marcia N; MUSTARD, John F. Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier. **Global Change Biology**, Wiley Online Library, v. 22, n. 10, p. 3405–3413, 2016.

STEFANOVIĆ, Gordana; MILUTINOVIĆ, Biljana; VUČIĆEVIĆ, Biljana; DENČIĆ-MIHAILOV, Ksenija; TURANJANIN, Valentina. A comparison of the analytic hierarchy process and the analysis and synthesis of parameters under information deficiency method for assessing the sustainability of waste management scenarios. **Journal of cleaner production**, Elsevier, v. 130, p. 155–165, 2016.

STRASSBURG, Bernardo B N; BROOKS, Thomas; FELTRAN-BARBIERI, Rafael; IRIBARREM, Alvaro; CROUZEILLES, Renato; LOYOLA, Rafael; LATAWIEC, Agnieszka E; FILHO, Francisco JB Oliveira; SCARAMUZZA, Carlos A de M; SCARANO, Fabio R *et al.* Moment of truth for the Cerrado hotspot. **Nature Ecology & Evolution**, Nature Publishing Group UK London, v. 1, n. 4, p. 0099, 2017.

STUART, Alan. The estimation and comparison of strengths of association in contingency tables. **Biometrika**, JSTOR, v. 40, n. 1/2, p. 105–110, 1953. doi: 10.2307/2333101.

SUELA, Attawan; NAZARETH, Marcos Spínola; CUNHA, Dênis Antônio da. Efeitos ambientais da implementação do plano ABC no Matopiba: uma abordagem por insumo-produto. **Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos**, v. 14, n. 4, p. 629–656, 2020.

TALUKDER, Byomkesh; BLAY-PALMER, Alison; HIPEL, Keith W *et al.* Towards complexity of agricultural sustainability assessment: Main issues and concerns. **Environmental and Sustainability Indicators**, Elsevier, v. 6, p. 100038, 2020.

TEMEL, Pelin; KENTEL, Elcin; ALP, Emre. Development of a site selection methodology for run-of-river hydroelectric power plants within the water-energy-ecosystem nexus. **Science of The Total Environment**, Elsevier, v. 856, p. 159152, 2023.

THIRUMURTHY, S; JAYANTHI, M; SAMYNATHAN, M; DURAISAMY, M; KABIRAJ, S; ANBAZHAHAN, N. Multi-criteria coastal environmental vulnerability assessment using analytic hierarchy process based uncertainty analysis integrated into gis. **Journal of Environmental Management**, Elsevier, v. 313, p. 114941, 2022.

THORSTENSEN, Vera; MOTA, Catherine Rebouças. Os impactos das barreiras e das medidas ambientais no comércio internacional: desafios para o brasil. In: ALVES, André Gustavo de Miranda Pineli (Ed.). **Boletim de Economia e Política Internacional**. Brasília-DF: Ipea, 2022. p. 103–135.

TRIGUEIRO, Werikson Rodrigues; NABOUT, Joao Carlos; TESSAROLO, Geiziane. Uncovering the spatial variability of recent deforestation drivers in the brazilian cerrado. **Journal of Environmental Management**, Elsevier, v. 275, p. 111243, 2020.

VALIZADEH, Naser; HAYATI, Dariush. Development and validation of an index to measure agricultural sustainability. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 280, p. 123797, 2021.

VEIGA, José Eli da. **Sustentabilidade: a legitimação de um novo valor**. 3. ed. São Paulo: Senac, 2019. ISBN 978-85-396-2886-5.

VIEIRA, Rita Marcia da Silva Pinto; TOMASELLA, Javier; BARBOSA, Alexandre Augusto; POLIZEL, Silvia Palotti; OMETTO, Jean Pierre Henry Balbaud; SANTOS, Fabrícia Cristina; FERREIRA, Yara da Cruz; TOLEDO, Peter Mann de. Land degradation mapping in the MATOPIBA region (Brazil) using remote sensing data and decision-tree analysis. **Science of The Total Environment**, Elsevier, v. 782, p. 146900, 2021.

VOGDRUP-SCHMIDT, Mathias; OLSEN, Søren Bøye; DUBGAARD, Alex; KRISTENSEN, Inge Toft; JØRGENSEN, Leif Bach; NORMANDER, Bo; EGE, Christian; DALGAARD, Tommy. Using spatial multi-criteria decision analysis to develop new and sustainable directions for the future use of agricultural land in denmark. **Ecological Indicators**, Elsevier, v. 103, p. 34–42, 2019.

VOGDRUP-SCHMIDT, Mathias; STRANGE, Niels; OLSEN, Søren B; THORSEN, Bo Jellesmark. Trade-off analysis of ecosystem service provision in nature networks. **Ecosystem Services**, Elsevier, v. 23, p. 165–173, 2017.

VOLKART, Kathrin; WEIDMANN, Nicolas; BAUER, Christian; HIRSCHBERG, Stefan. Multi-criteria decision analysis of energy system transformation pathways: A case study for Switzerland. **Energy Policy**, Elsevier, v. 106, p. 155–168, 2017.

WANDER, Alcido Elenor; TOMAZ, Gabriella Agapito; PINTO, Heverton Eustáquio. Uma avaliação formativa do plano ABC. **Revista de Política Agrícola**, v. 25, n. 3, p. 62–72, 2016.

WANG, Ying; YANG, Yun. Analyzing the green innovation practices based on sustainability performance indicators: a Chinese manufacturing industry case. **Environmental Science and Pollution Research**, Springer, v. 28, n. 1, p. 1181–1203, 2021.

WEID, Jean Marc van der. Articulação entre os diferentes componentes da sustentabilidade agrícola. **Raízes: Revista de Ciências Sociais e Econômicas**, v. 28, n. 1 e 2, p. 34–40, jul. 2010.

WESZ-JUNIOR, Valdemar João. O Pronaf pós-2014: intensificando a sua seletividade? **Revista Grifos**, v. 30, n. 51, p. 89–113, 2021.

WIDIATMAKA, Widiatmaka. Integrated use of GIS, AHP and remote sensing in land use planning for tropical high altitude vegetable crops. **Journal of Applied Horticulture**, v. 18, n. 2, p. 87–99, 2016.

WIDMARCK, JDJA. Em busca do desenvolvimento territorial rural do Matopiba: uma análise do cerrado. **Revista Economia Ensaios**, v. 35, n. 2, p. 1983–1994, 2020.

YAGER, Ronald R. Quantifier guided aggregation using OWA operators. **International Journal of Intelligent Systems**, Wiley Online Library, v. 11, n. 1, p. 49–73, 1996.

YANG, Dazhi; SONG, Wei. Tracking land use trajectory to map abandoned farmland in mountainous area. **Ecological Informatics**, Elsevier, v. 75, p. 102103, 2023.

YIN, He; JR, Amintas Brandão; BUCHNER, Johanna; HELMERS, David; IULIANO, Benjamin G; KIMAMBO, Niwaeli E; LEWINSKA, Katarzyna E; RAZENKOVA, Elena; RIZAYEVA, Afag; ROGOVA, Natalia *et al.* Monitoring cropland abandonment with Landsat time series. **Remote Sensing of Environment**, Elsevier, v. 246, p. 111873, 2020.

YU, Dejian; KOU, Gang; XU, Zeshui; SHI, Shunshun. Analysis of collaboration evolution in AHP research: 1982–2018. **International Journal of Information Technology & Decision Making**, World Scientific, v. 20, n. 01, p. 7–36, 2021.

YUILL, Robert S. The standard deviational ellipse; an updated tool for spatial description. **Geografiska Annaler: Series B, Human Geography**, Taylor & Francis, v. 53, n. 1, p. 28–39, 1971.

ZAKKAK, Sylvia; RADOVIC, Andreja; NIKOLOV, Stoyan C; SHUMKA, Spase; KAKALIS, Lefteris; KATI, Vassiliki. Assessing the effect of agricultural land abandonment on bird communities in southern-eastern Europe. **Journal of Environmental Management**, Elsevier, v. 164, p. 171–179, 2015.

ZHAO, Yiqing; KORSAKIENĖ, Renata; DINÇER, Hasan; YÜKSEL, Serhat. Identifying significant points of energy culture for developing sustainable energy investments. **SAGE Open**, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 12, n. 1, p. 21582440221087262, 2022.

ZILLI, Marcia; SCARABELLO, Marluce; SOTERRONI, Aline C; VALIN, Hugo; MOSNIER, Aline; LECLERE, David; HAVLIK, Petr; KRAXNER, Florian; LOPES, Mauricio Antonio; RAMOS, Fernando M. The impact of climate change on Brazil's agriculture. **Science of the Total Environment**, Elsevier, v. 740, p. 139384, 2020.