



*Amazônia Oriental*



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS  
MESTRADO ACADÊMICO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

BRUNA MYKAELLE PEREIRA SANTOS

**MUDANÇA DE USO E COBERTURA DA TERRA E VULNERABILIDADE  
AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ARAUAÍ, MOJU/PA**

BELÉM/PA  
2022

BRUNA MYKAELLE PEREIRA SANTOS

**MUDANÇA DE USO E COBERTURA DA TERRA E VULNERABILIDADE  
AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ARAUAÍ, MOJU/PA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Pará em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária /Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Área de Concentração: Clima e Dinâmica Socioambiental na Amazônia

Linha de Pesquisa: Ecossistemas Amazônicos e Dinâmicas Socioambientais

Orientador: Prof<sup>o</sup> Dr. José Francisco Berrêdo Reis da Silva

BELÉM/PA  
2022

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

S237m Santos, Bruna Mykaelle Pereira.  
MUDANÇA DE USO E COBERTURA DA TERRA E  
VULNERABILIDADE AMBIENTAL DA BACIA  
HIDROGRÁFICA DO RIO ARAUAÍ, MOJU/PA / Bruna  
Mykaelle Pereira Santos. — 2022.  
102 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. José Francisco Berrêdo Reis da Silva  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,  
Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Ciências  
Ambientais, Belém, 2022.

1. Vulnerabilidade Ambiental. 2. Geoprocessamento. 3.  
Mudança de Uso e Cobertura da Terra. I. Título.

CDD 333.707

---

**BRUNA MYKAELLE PEREIRA SANTOS**

**MUDANÇA DE USO E COBERTURA DA TERRA E VULNERABILIDADE  
AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ARAUAÍ, MOJU/PA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Pará em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária /Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Área de Concentração: Clima e Dinâmica Socioambiental na Amazônia

Linha de Pesquisa: Ecossistemas Amazônicos e Dinâmicas Socioambientais

Data de aprovação: 28/02/2022

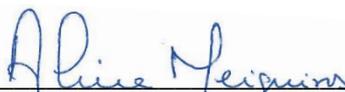
Banca Examinadora:



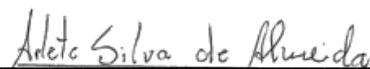
Prof<sup>o</sup> Dr. José Francisco Berrêdo Reis da Silva – Orientador  
Doutor em Geologia e Geoquímica  
Museu Paraense Emílio Goeldi – MPEG



Prof<sup>o</sup> Dr. Marcos Adami – Membro Interno  
Doutor em Sensoriamento Remoto  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE



Prof<sup>a</sup> Dra. Aline Maria Meiguins de Lima – Membro Interno  
Doutora em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido  
Universidade Federal do Pará – UFPA



Prof<sup>a</sup> Dra. Arlete Silva de Almeida – Membro Externo  
Doutora em Ciências Ambientais  
Museu Paraense Emílio Goeldi – MPEG

Trabalho dedicado ao bem mais valioso que possuo: minha família, a que eu nasci e a que eu escolhi construir.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, digno de honra e glória, aquele que segurou a minha mão e esteve e está comigo em todos os momentos da caminhada. Gratidão a meu marido e melhor amigo Bruno Santos pelo apoio incondicional, amor, por acreditar em mim e me incentivar a sempre alçar voos mais altos.

Agradeço à minha família: Milene Pereira (mãe), Bruno Silva (pai), Brena Pereira (irmã) e Lucca Pereira (sobrinho), os quais, pela distância, me fazem falta todos dias. Também agradeço à minha sogra Maria Paula por toda a dedicação e cuidado conosco.

Agradeço imensamente aos professores doutores que dedicaram seu tempo a me auxiliar na concretização desta pesquisa com toda a atenção e paciência: Dr. José Berredo, meu orientador e Dra. Arlete Almeida.

Tenho grande gratidão ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA) pela dedicação ao programa e por tratar o corpo discente de igual pra igual. Também agradeço a oportunidade de poder estudar na maior universidade do norte do Brasil, a Universidade Federal do Pará. Certamente foi uma grande honra.

Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de mestrado.

*“Nunca deixe que lhe digam que não vale a pena acreditar no sonho que se tem, ou que seus planos nunca vão dar certo, ou que você nunca vai ser alguém”*

*(Renato Russo)*

## RESUMO

Os investimentos que o Pará passou a receber a partir do lançamento do Zoneamento Agroecológico do Dendê e do Programa de Produção Sustentável de Óleo de Palma (PPSOP), em 2010, fizeram possível a expansão expressiva da cultura do dendê pelo nordeste paraense, onde encontrou condições climáticas ideais para tal. Desde então, empresas nacionais e internacionais se instalaram ao longo das rodovias paraenses visando a exploração agrícola. Neste contexto está inserida a Bacia Hidrográfica do Rio Arauá (BHRA), no município de Moju/Pará, Amazônia Oriental. Tendo em vista o panorama, a presente pesquisa busca quantificar e mapear a distribuição espacial dos níveis de vulnerabilidade ambiental da BHRA causada por atividades humanas e aspectos naturais, tendo como principal auxílio a metodologia estatística *Analytical Hierarchy Process* (AHP) desenvolvido por Saaty (1980) e geoprocessamento, além disso, busca-se a mudança de uso e cobertura da terra tendo como marco temporal o Programa de Produção Sustentável de Palma de Óleo (PPSOP) com o auxílio de Sistema de Informações Geográficas (SIG) e Sensoriamento Remoto. A partir dos resultados, foi possível definir áreas de 5 diferentes graus de vulnerabilidade ambiental – Muito Baixo, Baixo, Moderado, Alto e Muito Alto além de ter sido possível verificar que a quantidade de área convertida em dendê foi basicamente a mesma no período pré-PPSOP e pós-PPSOP, tendo a modificação ficado por conta da quantidade de área convertida de floresta primária para dendê, tendo esta diminuído no período pós-PPSOP.

Palavras-Chave: Sensibilidade ambiental. Geoprocessamento. Análise multicritério.

## **ABSTRACT**

The investments that Pará started to receive from the launch of the Agroecological Zoning of Palm Oil and the Program for Sustainable Production of Palm Oil (PPSOP), in 2010, made possible the expressive expansion of the palm culture in the northeast of Pará, where it found conditions ideal climate for this. Since then, national and international companies have been installed along the highways of Pará aiming at agricultural exploitation. In this context, the Arauaí River Basin (BHRA) is inserted, in the municipality of Moju/Pará, Eastern Amazon. In view of the panorama, the present research seeks to quantify and map the spatial distribution of the levels of environmental vulnerability of the BHRA caused by human activities and natural aspects, having as main aid the Analytical Hierarchy Process (AHP) statistical methodology developed by Saaty (1980) and geoprocessing, in addition, the change in land use and cover is sought, having as a time frame the Program for Sustainable Production of Palm Oil (PPSOP) with the help of Geographic Information System (GIS) and Remote Sensing. Based on the results, it was possible to define areas with 5 different degrees of environmental vulnerability - Very Low, Low, Moderate, High and Very High, in addition to verifying that the amount of area converted to oil palm was basically the same in the pre-PPSOP and post-PPSOP period, with the change being due to the amount of area converted from primary forest to oil palm, which decreased in the post-PPSOP period.

**Keywords:** Environmental sensitivity. Geoprocessing. Multicriteria analysis.

## LISTA DE FIGURAS

|  |     |
|--|-----|
| Figura 1. Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Arauaí.....   | 29  |
| Figura 2. Trajetórias do uso da terra de 1999–2020. O diagrama de sankey descreve as trajetórias de uso da terra de 1999 a 2020. Cada linha representa uma trajetória única apresentada na análise. A altura da barra representa a área em hectares tendo a vírgula como separador de milhar. A espessura de cada linha horizontal representa a área por parcela. .... | 40  |
| Figura 3. Uso e cobertura da terra dos anos 1999, 2010 e 2020 na Bacia Hidrográfica do Rio Arauaí .....  | 42  |
| Figura 4. Índice de proximidade da classe de floresta primária na BHRA .....   | 46  |
| Figura 5. Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Arauaí.....   | 55  |
| Figura 6. Representação esquemática da metodologia de avaliação de vulnerabilidade ambiental .....   | 56  |
| Figura 7. Distribuição espacial de vulnerabilidade para o fator hidrometeorológico .....   | 67  |
| Figura 8. Quantitativo de área dos cinco níveis de vulnerabilidade hidrometeorológico. O gráfico de barras representa a área percentual de cada nível.....   | 68  |
| Figura 9. Distribuição espacial de vulnerabilidade para o fator antrópico.....   | 69  |
| Figura 10. Quantitativo de área dos cinco níveis de vulnerabilidade do fator antrópico. O gráfico de barras representa a área percentual de cada nível.....  | 70  |
| Figura 11. Distribuição espacial de vulnerabilidade para o fator natural.....  | 71  |
| Figura 12. Quantitativo de área dos cinco níveis de vulnerabilidade do fator natural. O gráfico de barras representa a área percentual de cada nível.....  | 72  |
| Figura 13. Distribuição espacial de vulnerabilidade para o fator topográfico.....  | 73  |
| Figura 14. Quantitativo de área dos cinco níveis de vulnerabilidade do fator topográfico. O gráfico de barras representa a área percentual de cada nível.....  | 74  |
| Figura 15. Distribuição espacial da vulnerabilidade ambiental da Bacia do Rio Arauaí.....  | 75  |
| Figura 16. Quantitativo de área dos cinco níveis de vulnerabilidade ambiental. O gráfico de barras representa a área percentual de cada nível.....   | 76  |
| Figura 17. Zoneamento da Bacia do Rio Arauaí em regiões de proteção .....  | 79  |
| Figura 18. Mapas temáticos dos indicadores do fator hidrometeorológico: (a) Distância de Corpos Hídricos (metros); (b) TST (°C); (c) NDMI.....   | 98  |
| Figura 19. Mapas temáticos dos indicadores do fator antrópico: (a) NDVI; (b) Distância de Estradas (metros); (c) Mudança de Cobertura e Uso da Terra. ....   | 99  |
| Figura 20. Mapas temáticos dos indicadores do fator natural: (a) Geomorfologia; (b) Geologia; (c) Pedologia. ....  | 100 |
| Figura 21. Mapas temáticos dos indicadores do fator topográfico: (a) Elevação; (b) Declividade.....  | 101 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1. Caracterização das classes de cobertura e uso da terra identificadas .....  | 31 |
| Tabela 2. Índice de qualidade Kappa.....  | 33 |
| Tabela 3. Métricas da paisagem obtidas ao nível de classe.....  | 36 |
| Tabela 4. Tipos de uso da terra convertidos diretamente para dendê nos onze anos anteriores e dez anos posteriores ao lançamento do PPSOP .....   | 38 |
| Tabela 5. Métricas de paisagem referentes a análise da forma das manchas .....  | 43 |
| Tabela 6. Métricas de paisagem referentes a análise da borda das manchas.....   | 44 |
| Tabela 7. Índice de proximidade média das manchas (500 m de distância) .....  | 45 |
| Tabela 8. Definição e explicação dos 9 pesos fundamentais de julgamento comparativo .....   | 60 |
| Tabela 9. Fatores e variáveis usadas no cálculo de vulnerabilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Arauaí .....  | 61 |
| Tabela 10. Distribuição dos graus de vulnerabilidade ambiental, segundo a análise multicritério AHP para a Bacia do Rio Arauaí. Moju. Pará .....  | 77 |
| Tabela 11. Matriz de comparação de pares, pesos das classes, e Índice de Consistência (CR). .....   | 94 |
| Tabela 12. Padronização dos indicadores dos fatores de relevância para a vulnerabilidade ambiental, classificados de 1 a 5, sendo 1, característica menos vulnerável e 5, característica mais vulnerável..... | 95 |

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Abrapalma – Associação Brasileira de Produtores de Óleo de Palma

AHP – *Analytical Hierarchy Process*

APP – Área de Proteção Permanente

BHRA – Bacia Hidrográfica do Rio Arauá

CAR – Cadastro Ambiental Rural

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Finep – Financiadora de Estudos e Projetos

INPE – Instituto de Pesquisas Espaciais

MaxVer – Máxima Verossimilhança

NDMI – Normalized Difference Moisture Index

NDVI – Normalized Difference Vegetation Index

ONG – Organizações Não-Governamentais

PNPB – Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel

PPSOP – Programa de Produção Sustentável de Óleo de Palma

RL – Reserva Legal

SIG – Sistema de Informações Geográficas

TST – Temperatura da Superfície da Terra

## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO GERAL .....  | 14 |
| 1.1 Paisagem .....   | 15 |
| 1.2 Vulnerabilidade Ambiental .....  | 17 |
| 1.3 Sensoriamento Remoto e SIG aplicados às análises ambientais .....  | 19 |
| 1.4 Justificativa e interdisciplinariedade da pesquisa .....   | 21 |
| 1.5 Objetivos .....  | 22 |
| 1.5.1 Objetivo Geral .....   | 22 |
| 1.5.2 Objetivos Específicos .....  | 22 |
| 1.6 Estrutura da Dissertação .....   | 23 |
| CAPÍTULO 2 – ANÁLISE DA MUDANÇA DO USO E COBERTURA DA TERRA E DE PAISAGEM DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ARAUAÍ – AMAZÔNIA BRASILEIRA..... | 24 |
| 2.1 Introdução .....   | 25 |
| 2.1.1 A palma de óleo no mundo.....  | 25 |
| 2.1.2 Potencial do Brasil e atual cenário .....  | 25 |
| 2.2 Material e Métodos .....   | 28 |
| 2.2.1 Área de Estudo .....   | 28 |
| 2.2.2 Análise dos dados .....  | 30 |
| 2.2.3 Análise de Paisagem.....   | 33 |
| 2.3 Resultados e Discussão .....   | 38 |
| 2.4 Conclusão.....   | 47 |
| Referências .....  | 48 |
| CAPÍTULO 3 – VULNERABILIDADE AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ARAUAÍ – MOJU/PA, AMAZÔNIA BRASILEIRA .....                          | 52 |
| 3.1 Introdução .....   | 53 |
| 3.2 Material e métodos.....  | 54 |
| 3.2.1 Área de estudo .....   | 54 |
| 3.2.2 Análise de dados .....   | 56 |
| 3.2.3 Aquisição de Dados e Processamento .....   | 56 |
| 3.2.4 Temperatura da Superfície da Terra (TST) .....   | 57 |
| 3.2.5 Normalized Difference Moisture Index (NDMI) .....  | 58 |
| 3.2.6 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).....   | 58 |
| 3.2.7 Variáveis Topográficas.....  | 58 |

|       |  |           |
|-------|--|-----------|
| 3.2.8 | Padronização dos Indicadores .....               | 59        |
| 3.2.9 | Análise Estatística .....                        | 59        |
| 3.3   | Resultados e discussão .....                     | 66        |
| 3.3.1 | Vulnerabilidade do Fator Hidrometeorológico..... | 66        |
| 3.3.2 | Vulnerabilidade do Fator Antrópico.....          | 69        |
| 3.3.3 | Vulnerabilidade do Fator Natural .....           | 71        |
| 3.3.4 | Vulnerabilidade do Fator Topográfico .....       | 73        |
| 3.3.5 | Vulnerabilidade Ambiental.....                   | 75        |
| 3.3.6 | Zoneamento para gestão e proteção ambiental..... | 78        |
| 3.4   | Conclusão.....                                   | 80        |
|       | Referências .....                                | 81        |
|       | <b>CAPÍTULO 4 – CONCLUSÃO GERAL.....</b>         | <b>84</b> |
| 4.1   | Conclusões de forma integrada.....               | 84        |
| 4.2   | Recomendações .....                              | 85        |
|       | Referências .....                                | 86        |
|       | Apêndice.....                                    | 94        |

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO GERAL

É de conhecimento comum que a região amazônica é banhada por extensos rios e, por isso, é detentora de grande parte da água doce disponível no planeta. Porém, a falta de gestão ou a gestão inadequada deste recurso pode ocasionar uma série de problemas que levam à perda de disponibilidade hídrica, seja em aspectos quantitativos quanto qualitativos (BORDALO et al., 2012; FERREIRA; LIMA; CORRÊA, 2017).

Além da crise hídrica, a Amazônia enfrenta o desmatamento latente das últimas décadas, que tem gerado grave impacto ambiental pela perda de biodiversidade (VIEIRA et al., 2008), perda de solos por erosão, assoreamento de corpos d'água (CARVALHO, 2012), além de impactos sociais como a perda de território e renda. O Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) através do projeto PRODES que realiza o monitoramento do desmatamento na Amazônia Legal por imagens de satélites afirma que até o ano de 2019, cerca de 800.000 km<sup>2</sup> da floresta já foram desmatados, essa área corresponde a 20% da cobertura original da floresta. Segundo o que consta nas tabelas publicadas pelo PRODES, desse total, cerca de 270.000 km<sup>2</sup> foram desmatados nos últimos 19 anos.

Neste contexto está inserida a Bacia Hidrográfica do Rio Aruaí, localizada no nordeste paraense. Essa porção da Amazônia tem vivenciado uma era desenvolvimentista devido a chegada da monocultura do dendê. Sob incentivos de programas governamentais que visavam o fomento da produção de biodiesel Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel - PNPB/2004 (BRASIL, 2019) e o Programa de Produção Sustentável de Palma de Óleo – PPSOP/2010 (BRASIL, 2016), empresas nacionais e internacionais se instalaram ao longo das rodovias paraenses visando a exploração agrícola.

Tendo em vista o panorama apresentado, a presente pesquisa busca quantificar e mapear a distribuição espacial dos níveis de vulnerabilidade ambiental da Bacia do Rio Aruaí (BHRA) causada por atividades humanas e aspectos naturais, tendo como principal auxílio técnicas e produtos de geotecnologias, além de analisar a mudança de uso e cobertura da terra tendo como marco temporal o Programa de Produção Sustentável de Palma de Óleo. Os resultados poderão ser utilizados para auxiliar as políticas públicas e o planejamento ambiental da região e em tomada de decisões.

## 1.1 Paisagem

Aziz Ab'Saber (1977) trabalha o conceito de paisagem como sendo sempre uma herança. Herança de processos fisiográficos e biológicos, e patrimônio coletivo dos povos que historicamente as herdaram como território de atuação de suas comunidades.

Cabral (2000, p.38) destaca que “a paisagem não pode ser considerada isoladamente e nem ser dissociada do sujeito que a vivencia.” Logo, é possível identificar a ideia de considerar o homem na análise da paisagem, enfatizando que ele além de agente transformador, é também um agente perceptivo dela. Essa ideia é substancial e é considerada por todos os autores citados neste tópico.

Salgueiro (2001) observa a linha de estudo da paisagem que privilegia as características de uma área expressas nos seus atributos físico-naturais e humanos e o estudo das inter-relações dos fenômenos nesse território, o que permite aproximar o conceito de paisagem do conceito de região. Santos (2002) cita que “considerada em si mesma, a paisagem é apenas uma abstração, apesar de sua concretude como coisa material. Sua realidade é histórica e lhe advém de sua associação com o espaço social”.

Bertrand (2004, p. 141) afirma que a paisagem não é a simples adição de elementos geográficos incoerentes. É, numa determinada porção do espaço, o resultado da combinação dinâmica, portanto instável, de elementos físicos, biológicos e antrópicos que, reagindo dialeticamente uns sobre os outros, fazem da paisagem um conjunto único e indissociável, em perpétua evolução. O autor continua dizendo que as paisagens ditas “físicas” são com efeito quase sempre amplamente remodeladas pela exploração antrópica.

Ainda segundo a visão de Bertrand, a noção de escala é inseparável do estudo das paisagens. A divisão em parcelas, territórios, comunidades, bairros vai então constituir um dos critérios essenciais do que ele chama de “taxonomia das paisagens”. Apesar do mesmo considerar que todas as delimitações geográficas são arbitrárias e “é impossível achar um sistema geral do espaço que respeite os limites próprios para cada ordem de fenômenos” ele também diz que se pode vislumbrar uma taxonomia das paisagens com dominância física sob a condição de fixar limites.

Bertrand defende que o sistema taxonômico deve permitir classificar as paisagens em função da escala, isto é, situá-las na dupla perspectiva do tempo e do espaço. Existem, para cada ordem de fenômenos, “inícios de manifestações” e de

“extinção” e por eles pode-se legitimar a delimitação sistemática das paisagens em unidades hierarquizadas. Isto significa dizer que a definição de uma paisagem é função da escala.

Sandeville Jr. (2005) enfatiza que a paisagem é objeto geográfico e percebido, mas é também objeto-ação: em processo, dinâmico e significante. O autor descreve paisagem como um fato social, antes mesmo de ser uma forma ou figura, a demandar sempre um posicionamento no debate da cultura e da política. Além disso, a paisagem é tratada como algo instável, um permanente vir a ser, e permanente transformação. Sugere, então, a questão da forma subordinando-se a dos processos, que se definem em um campo social e natural relacionado.

“É necessário distinguir, definitivamente, paisagem da representação pictórica ou figurativa da paisagem” alerta Sandeville Jr. Ou seja, aquilo que na pintura corresponde a uma representação, domínio do imaginário e uma inequívoca problemática cultural, transposto como base de entendimento para o espaço a que, simbolicamente, refere-se, conduziria a uma percepção, na maioria das vezes, estática e não essencial. O autor enfatiza que o problema maior ocorrerá quando se pretender entender e lidar com a paisagem a partir de sua estereotipação como uma figura (bidimensionalidade, rapidamente, referida a uma forma, como contrapartida de sua desmaterialização), desvinculando-a de sua natureza processual complexa, a qual ocorre e se explica a partir de processos sociais e naturais. A partir disto, ele frisa que a paisagem, mais do que espaço observado, trata-se de espaço vivenciado, da sensibilidade das pessoas com seu entorno.

A paisagem se constitui em um ambiente ativo, dinâmico, complexo e integrado, que se encontra em constante processo evolutivo. Os elementos que a constituem, igualmente, não se encontram desconectados, e mantêm sempre uma relação de diálogo e interdependência entre si (LOPES; RIBEIRO, 2016).

Segundo Rodriguez; Silva e Cavalcanti (2017) a “paisagem” é definida como um conjunto inter-relacionado de formações naturais e antroponaturais, podendo-se considerá-la como: um sistema que contém e reproduz recursos, como um meio de vida e da atividade humana e como um laboratório natural e fonte de percepções estéticas.

Os conceitos apresentados neste tópico são essencialmente complementares e refletem a maneira como será conduzida a pesquisa em relação ao conceito de paisagem, ou seja, sob a visão histórica de herança de povos, objeto-ação dinâmico,

ambiente complexo em constante evolução e transformação, tendo elementos e processos físicos, biológicos e antrópicos que estabelecem diálogo e interdependência entre si. Como bem colocado por Bertrand, para a análise da paisagem existe a necessidade de sua delimitação no espaço e no tempo. Por isto, nesta pesquisa a delimitação da paisagem no espaço foi feita com base no conceito de Bacia Hidrográfica como unidade territorial de estudo e no tempo com base nos anos de 1999, 2010 e 2020.

## **1.2 Vulnerabilidade Ambiental**

A análise de vulnerabilidade ambiental permite avaliar o risco de sistemas ambientais sofrerem impactos frente a determinadas pressões. Essa informação é útil no planejamento ambiental, possibilitando identificar regiões onde a degradação ambiental resultante de uma dada ação tem potencial de causar maior impacto e desenvolver programas visando à redução das fontes de pressão (FIGUEIRÊDO et al., 2010).

Tagliani (2003) conceitua vulnerabilidade ambiental como a maior ou menor susceptibilidade de um ambiente a um impacto potencial provocado por um uso antrópico qualquer. Quando o ambiente é apropriado pelo homem através de suas diversas formas de uso e ocupação, sem a concordância com as limitações e potencialidades desse meio, ocorrem alterações nas conexões e fluxos que movimentam esse sistema, podendo trazer riscos à população ocupante ou à atividade vigente. Nessa situação, na qual se inclui no ambiente um novo elemento à sua dinâmica, o fator antrópico, é caracterizada como vulnerabilidade ambiental, que, para Tagliani (2003), é uma maior ou menor susceptibilidade que um ambiente qualquer apresenta a um potencial impacto negativo provocado por ações antrópicas.

Lage; Peixoto e Vieira (2009) em seu trabalho destacam que vulnerabilidade ambiental pode ser entendida como a suscetibilidade maior ou menor de pessoas, lugares, infraestruturas ou ecossistemas de sofrerem algum tipo de risco, perigo ou agravo, desta forma, caracteriza-se pelo potencial da paisagem em absorver impactos.

Autores como Grigio (2003) e Costa (2006) trabalham o conceito de vulnerabilidade natural como aquela que decorre de aspectos naturais intrínsecos ao sistema analisado como a geomorfologia, a geologia, a pedologia, a hidrologia, a vegetação natural, a climatologia, entre outros fatores naturais, e esta diferencia-se da

vulnerabilidade ambiental porque não está ligada necessariamente às modificações antropogênicas feitas no meio.

A vulnerabilidade ambiental também é encontrada na literatura com outras nomenclaturas como no estudo de Ross (1990;1994), que a definiu como fragilidade ambiental, entendida a partir de duas situações distintas: a Fragilidade Ambiental Potencial e a Fragilidade Ambiental Emergente. A primeira considera a fragilidade natural do ambiente a que uma determinada área está submetida, tomando como elementos significantes a declividade da área e o tipo de solo. A segunda considera estes elementos naturais, acrescido do elemento humano, a partir da forma como este utiliza o ambiente.

Coelho (2010) afirma que o mapeamento da vulnerabilidade em determinado território, possibilita a identificação de áreas suscetíveis a possíveis impactos ambientais, por isso torna-se uma ferramenta importante ao planejamento ambiental e ao ordenamento territorial. A representação cartográfica da vulnerabilidade e os processos erosivos, ou poluidores, ou o zoneamento por graus de riscos facilitam a compreensão da geografia dos impactos ambientais.

Os estudos de vulnerabilidade têm sido empregados em diversos locais como em regiões metropolitanas (JORDAO, 2011; SERRÃO; BELATO; DIAS, 2019), ambientes costeiros (TAGLIANI, 2003), barragens (LATRUBESSE et al., 2017), bacias hidrográficas (COSTA, 2018; WEI et al., 2020) e para diversos fins de avaliação como vulnerabilidade à inundações (SZEWRÁŃSKI et al., 2018), à vazamentos de óleo (ROMERO et al., 2013), à impactos humanos e naturais (NGUYEN; LIU, 2019), entre outros.

O conceito de vulnerabilidade ambiental a ser utilizado nesta pesquisa será o que consta em Grigio (2003) e Costa (2006), ou seja, a vulnerabilidade ambiental como o risco de determinado ambiente sofrer impactos negativos levando em consideração aspectos intrínsecos do mesmo decorrentes de características naturais como declividade, temperatura e corpos hídricos (vulnerabilidade natural) somada às intervenções antropogênicas no ambiente, dadas, principalmente, pela mudança de uso e cobertura da terra.

### **1.3 Sensoriamento Remoto e SIG aplicados às análises ambientais**

Os estudos já existentes sobre vulnerabilidade ambiental como o de Tagliani (2003), Jordao (2011), Serrão; Belato; Dias (2019), Nguyen; Liou (2019), Costa (2018), Wei et al., (2020) utilizam-se de metodologias diferenciadas entre si, pois a escolha do método está diretamente ligada ao conhecimento prévio do local de estudo pelo pesquisador. A maioria das metodologias fazem uso do sensoriamento remoto e do Sistema de Informações Geográficas (SIG) como ferramenta principal ou secundária de análise e extração de dados.

Sensoriamento Remoto é a ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres (MENESES et al., 2012).

Conforme Beasley e Barnhart (2017), o amplo campo do sensoriamento remoto já a tempos desempenha um papel essencialmente produtivo no estudo da terra, do meio ambiente e nosso sistema solar. Através do advento e proliferação de veículos aéreos e sistemas de imagem espaciais, os pesquisadores têm a capacidade de medir as características físicas e químicas da geologia da superfície da terra e corpos planetários, monitorar mudanças na biomassa vegetativa de continentes inteiros, rastrear a migração global de água, medir o fluxo de calor da superfície, imaginar a deformação da superfície da terra induzida por humanos e processos naturais e muitas outras aplicações.

SIG é um sistema que processa dados gráficos e não gráficos (alfanuméricos) com ênfase a análises espaciais e modelagens de superfícies. Algumas definições: "Um conjunto manual ou computacional de procedimentos utilizados para armazenar e manipular dados georeferenciados (ARONOFF, 1989).

Os Sistemas de Informação Geográfica têm facilitado as análises ambientais e as atividades relacionadas à caracterização, ao diagnóstico e ao planejamento ambiental e urbano, auxiliando em tarefas como a simulação do espaço geográfico e de seus processos naturais, na integração de informações espaciais (RIBEIRO et al., 1999).

Liou; Nguyen e Li (2017) em seu trabalho de avaliação da vulnerabilidade socioambiental espaço-temporal utilizando dados do satélite Landsat demonstraram

como os dados dos sensores remotos podem ser usados para apoiar os planejadores a obter medições objetivas e contexto comparativo.

Braga et al. (2019) em seu estudo sobre a fragmentação florestal da Bacia do Rio Moju afirma que o uso do sensoriamento remoto se mostra uma ferramenta eficiente para a aquisição e análise de dados ambientais, apoiando o planejamento ambiental.

Andrade et al. (2010) elaborou um índice de vulnerabilidade socioeconômica e natural para derramamentos de óleo em um complexo portuário situado na zona costeira do estado do Maranhão, utilizando usando SIG e sensoriamento remoto e pôde concluir em sua análise que dentre as unidades geomorfológicas presentes na área de estudo, a planície estuarina é a mais vulnerável. Andrade e Szlafsztein (2018) avaliaram a vulnerabilidade a inundações e enchentes no município de Santarém baseando sua metodologia principalmente em sensoriamento remoto, análise estatística e análise espacial através de SIG.

Moraes et al. (2016) subsidiados pelas imagens produto dos satélites Landsat 5 e Landsat 8, realizaram o monitoramento da abertura no dossel a partir de fotografias hemisféricas em uma área de concessão florestal no Pará. Outros exemplos de trabalhos que empregam uso de imagens do satélite Landsat são: Masek et al. (2001), Schneider (2012), Jia et al. (2014), Johnson (2015) e Souza-Filho et al. (2015).

O sensoriamento remoto e o SIG, além de outras aplicações, podem também ser utilizados em estudos de sazonalidade de tipos de vegetação (ADAMI, 2018), zoneamento de bacia hidrográfica (FERREIRA; LIMA; CORRÊA, 2017), mapeamento de zonas de perigo de deslizamento de terras (DHAKAL; AMADA; ANIYA, 2000; TRIPATHI et al., 2018), estudos geológicos (MEER et al., 2012; ALLOU; BONIN, 2015).

#### 1.4 Justificativa e interdisciplinariedade da pesquisa

A Bacia Hidrográfica do Rio Arauaí (BHRA) tem passado por um processo de mudanças nas últimas décadas, principalmente relacionadas à cultura do dendê, que tem modificado as relações sociais, a relação do homem com a terra, o uso e ocupação da terra, o uso da água e toda a dinâmica local. A pecuária e a dendeicultura são as duas atividades agrícolas que mais tem modificado a cobertura florestal (ALMEIDA, 2015).

A BHRA é considerada área consolidada com plantação de dendê desde os anos 80, apesar disso, foi nos anos 2000 em que surgiram fortes incentivos governamentais para o desenvolvimento e ampliação desta cultura dentro da Amazônia. Nesta mesma época, a empresa Agropalma estabeleceu parceria com agricultores familiares da região, incluindo os agricultores da Bacia do Rio Arauaí, tendo tal parceria perdurado até os dias atuais (ALMEIDA, 2015; NAHUM; SANTOS, 2017).

Este processo desenvolvimentista da região traz impactos, sejam positivos ou negativos, para o ambiente e a sociedade envolvidos. Por isso, é importante que estudos forneçam informações e conhecimentos que auxiliem a tomada de decisão relacionados à gestão e ao planejamento da Bacia. Voltado ao desenvolvimento sustentável, este estudo fornecerá um panorama sobre a vulnerabilidade ambiental da região levando em consideração vários indicadores que melhor definem a situação atual da bacia.

Portanto, a escolha de desenvolver esta pesquisa na bacia do Rio Arauaí, município de Moju, estado do Pará, é justificada pelas modificações substanciais na paisagem, provocadas principalmente pelo avanço da cultura do dendê (*Elaeis guineensis* Jacq.) e pela pecuária, estas atividades estão reconfigurando a paisagem e ao longo dos anos tem direcionado o uso e ocupação da terra na região. Além disso, a bacia sofre grande pressão hídrica pela pecuária, plantações de dendê e indústria comparado ao seu pequeno tamanho e por esta razão ela pode vir a desaparecer (NAHUM; BASTOS, 2014; ALMEIDA, 2015)

## 1.5 Objetivos

### 1.5.1 Objetivo Geral

Analisar a mudança de uso e ocupação da terra entre os anos de 1999, 2010 e 2020 e mapear a distribuição espacial dos níveis de vulnerabilidade ambiental, considerando os fatores principais de impacto da Bacia Hidrográfica do Rio Arauaí (BRA), causados por atividades humanas e aspectos naturais.

### 1.5.2 Objetivos Específicos

- a) Mapear a cobertura vegetal e o uso da terra da Bacia do Rio Arauaí dos anos de 1999, 2010 e 2020;
- b) Elaborar mapas temáticos de vulnerabilidade para cada um dos fatores principais de impacto: hidrometeorológico, antrópico, topográfico e naturais;
- c) Identificar áreas com diferentes níveis de vulnerabilidade considerando cada um dos fatores principais de impacto.

## 1.6 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está dividida em 4 capítulos. Sendo eles: Capítulo 1 – Introdução Geral; Capítulo 2 – Análise da mudança do uso e cobertura da terra e de paisagem da Bacia Hidrográfica Do Rio Arauaí – Amazônia Brasileira e Capítulo 3 – Vulnerabilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Arauaí – Moju/PA, Amazônia Brasileira.

O capítulo 1 apresenta uma introdução geral de alguns pontos da pesquisa. Nele poderá ser encontrado conceitos importantes como paisagem, sensoriamento remoto, SIG e vulnerabilidade ambiental, além de aspectos metodológicos, justificativa e objetivos geral e específicos.

O capítulo 2 versa sobre a análise de mudança do uso e cobertura da terra e análise de paisagem da Bacia do Rio Arauaí no município de Moju/Pará, Amazônia Oriental. Neste capítulo busca-se estabelecer quais as principais mudanças ocorridas na bacia nos períodos pré e pós Programa de Produção Sustentável de Óleo de Palma (PPSOP), dando enfoque na expansão do dendê na bacia.

O capítulo 3 é dedicado à abordagem sobre a vulnerabilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Arauaí. O método estatístico Analytical Hierarchy Process (AHP) conjuntamente com Sistema de Informação Geográfica (SIG) foram utilizados para a análise espacial dos indicadores da bacia. A partir dos resultados, foi possível definir áreas de 5 diferentes graus de vulnerabilidade ambiental – Muito Baixo, Baixo, Moderado, Alto e Muito Alto.

Finalmente, o capítulo 4 encerra a dissertação apresentando uma conclusão geral. Neste capítulo é possível verificar os resultados chaves (impactos e implicações), as conclusões de forma integrada, prioridades para pesquisas futuras e considerações finais.

## **CAPÍTULO 2 – ANÁLISE DA MUDANÇA DO USO E COBERTURA DA TERRA E DE PAISAGEM DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ARAUÁI – AMAZÔNIA BRASILEIRA**

### **RESUMO**

A partir do lançamento do Zoneamento Agroecológico do Dendê e do Programa de Produção Sustentável de Óleo de Palma (PPSOP), em 2010, o dendê (ou palma) passou a receber investimentos maciços, principalmente no estado do Pará - maior estado produtor (GLASS, 2013). Esses investimentos fizeram possível a expansão expressiva dessa agricultura pelo nordeste paraense, onde encontrou condições climáticas ideais para tal. Tendo tal fato em vista, a presente pesquisa busca estabelecer quais as principais mudanças no uso e cobertura da terra nos períodos pré-PPSOP (1999-2010) e pós-PPSOP (2010-2020) na Bacia Hidrográfica do Rio Arauá (BHRA), no município de Moju/Pará, Amazônia Oriental. Além disso busca-se responder se houve expansão do dendê na bacia e se ela evoluiu dentro dos objetivos estabelecidos no programa. Para atender a tais objetivos, foi elaborada uma análise espaço-temporal da BHRA nos anos de 1999, 2010 e 2020 utilizando como ferramenta principal Sistema de Informações Geográficas (SIG) e Sensoriamento Remoto. Verificou-se que a quantidade de área convertida em dendê foi basicamente a mesma no período pré-PPSOP e pós-PPSOP, a modificação ficou por conta da quantidade de área convertida de floresta primária para dendê, tendo esta diminuído no período pós-PPSOP.

Palavras-Chave: Dendeicultura. Landsat. Geoprocessamento.

### **ABSTRACT**

After the launch of the Dendê Agroecological Zoning and the Palm Oil Sustainable Production Program (PPSOP), in 2010, palm oil began to receive massive investments, mainly in the state of Pará - the largest producing state (GLASS, 2013). These investments made possible the expressive expansion of this agriculture in the northeast of Pará, where it found ideal climatic conditions for this. With this in mind, the present research seeks to establish the main changes in land use and cover in the pre-PPSOP (1999-2010) and post-PPSOP (2010-2020) periods in the Arauá River Basin (BHRA), in the municipality of Moju/Pará, Eastern Amazon. In addition, it seeks to answer whether there was an expansion of oil palm in the basin and whether it evolved within the objectives established in the program. To meet these objectives, a spatio-temporal analysis of the BHRA was carried out in the years 1999, 2010 and 2020 using the Geographic Information System (GIS) and Remote Sensing as the main tool. It was found that the amount of area converted to oil palm was basically the same in the pre-PPSOP and post-PPSOP period, the change was due to the amount of area converted from primary forest to oil palm, which decreased in the post-PPSOP period.

Keywords: Palm oil. Landsat. Geoprocessing.

## 2.1 Introdução

### 2.1.1 A palma de óleo no mundo

De acordo com Oosterveer (2015), a demanda global por óleo de palma está aumentando para atender às necessidades mundiais de óleo de cozinha, ingredientes alimentícios, biocombustíveis, sabão e outros produtos químicos. Em resposta, a produção de óleo de palma está se expandindo rapidamente, o que promove o crescimento econômico nos países produtores, mas também leva a graves problemas ambientais e sociais como a destruição de florestas tropicais, mudanças climáticas e ameaças aos meios de subsistência dos pequenos proprietários de terra. Por essas razões, a produção e o uso do óleo de palma tornaram-se altamente controversos.

O maior problema ambiental em decorrência da expansão das plantações de dendê pelo mundo é o desmatamento das florestas tropicais. Os resultados dos estudos de Gutierrez-Vélez et al. (2011) mostraram que a agricultura de alto rendimento é uma estratégia importante, mas insuficiente para reduzir a pressão sobre as florestas.

Wicke (2011) concluiu que na Indonésia, a mudança de uso e cobertura da terra pode principalmente ser caracterizada pela perda de cobertura florestal em 40 milhões de hectares (Mha) de terra, uma redução de 30% em terras florestais. Enquanto que o uso da terra para plantações de dendê cresceu de 0.1 Mha em 1975 para 5.5 Mha em 2005 neste país.

Já na América Latina, Furumo e Aide (2017) demonstraram que a expansão do dendê tem ocorrido de forma diferente pois calculam que 79% das plantações de dendê substituíram terras anteriormente intervencionadas, principalmente por pastagens (56%).

### 2.1.2 Potencial do Brasil e atual cenário

Quase metade da área terrestre do Brasil - essencialmente localizada na Amazônia - é até certo ponto adequada para o plantio da palmeira de dendê, o que corresponde a uma área total de 417 Mha, tornando-o o país número um em termos de hectares adequados. Ou seja, o potencial de expansão da palma de óleo no Brasil, mais especificamente na Amazônia, é expressivo (PIRKER et al., 2016).

A partir do ano de 2004 até 2012, a Amazônia experimentou um decréscimo em suas taxas de desmatamento anuais. Resultado de esforços como a intensificação nas operações de fiscalização, repressão às madeireiras, aos grileiros de terra e aos pecuaristas, restrição de créditos para infratores das leis ambientais, atuação de Organizações Não Governamentais (ONGs) (BRASIL, 2016) e a pressão internacional por medidas de proteção ambiental à Amazônia. Neste cenário de evolução da preocupação com as questões ambientais é que surgiram inquietações com o histórico mundial de destruição das florestas tropicais pelas plantações de dendê.

Foi nesta época que a EMBRAPA realizou o Zoneamento Agroecológico para a Cultura da Palma de Óleo na Amazônia (ZAE), onde identificou 31,2 Mha aptos para plantio do dendê resultantes de áreas desflorestadas na Amazônia Legal (RAMALHO FILHO et al., 2010).

O Zoneamento Agroecológico do Dendê para as Áreas Desmatadas da Amazônia Legal – (ZAE-Dendê), foi elaborado sob encomenda do Governo Federal, com apoio financeiro da Financiadora de Estudos e Projetos (Finep). O trabalho possibilitou conhecer e espacializar o potencial agroecológico da produção da cultura do dendezeiro, visando a produção de óleo para alimentação humana e para biocombustível de forma sustentável e com impacto reduzido sobre a biodiversidade da região (EMBRAPA, 2010).

Brandão et al. (2021) relata que o ZAE deu base para a criação do Programa de Produção Sustentável de Óleo de Palma, que proibiu a supressão de vegetação nativa e determinou a exclusão de todas as áreas de conservação, reservas indígenas e áreas de quilombolas para plantio de óleo de palma. As áreas priorizadas pelo programa são as degradadas na Amazônia Legal e as áreas utilizadas para cana-de-açúcar do Nordeste. Desde o início, o governo federal buscou desenvolver um modelo alternativo de governança para o setor que busca explicitamente conciliar conservação, desenvolvimento setorial e redução da pobreza.

Por meio do Programa de Produção Sustentável de Óleo de Palma (PPSOP), lançado em 2010, o governo estabeleceu uma estrutura de governança que visa criar condições propícias para a expansão das plantações de dendezeiros e capacidade industrial na Amazônia brasileira, ao mesmo tempo: (a) restringindo a expansão a áreas degradadas para evitar o desmatamento e restaurar terras degradadas, e (b) promovendo a inclusão social por meio do incentivo às empresas a envolver os pequenos agricultores

em suas cadeias de abastecimento por meio de agricultura contratual (BRANDÃO e SCHONEVELD, 2015).

Sob a influência do boom de commodities, economia vibrante e forte discurso político de inclusão social e energia verde (CÉSAR; BATALHA; ZOPELARI, 2013), o programa foi construído em três pilares: econômico, social e ambiental, como por exemplo o desmatamento zero, restauração de áreas degradadas e promoção da inclusão de pequenos proprietários de terra. O programa contou com uma combinação de conservação geral, políticas e procedimentos agrários e sociais relacionados à posse da terra, legislação florestal, acesso ao crédito e condições de trabalho (VILLELA et al., 2014).

A partir do lançamento do Zoneamento Agroecológico do Dendê e do Programa de Produção Sustentável de Óleo de Palma (PPSO), em 2010, o dendê (ou palma) passou a receber investimentos mais vultosos, principalmente no estado do Pará - maior estado produtor (GLASS, 2013).

Como resultado dos investimentos, em quase quatro anos, a área ocupada por dendezais no Brasil triplicou: os 50 mil hectares de 2010 saltaram para 160 mil hectares em 2014. Só o estado do Pará concentrava 95% dessa área, aponta o Ministério do Desenvolvimento Agrário (NEHER, 2014). Em 2021, segundo dados da Associação Brasileira de Produtores de Óleo de Palma (Abrapalma), o Pará já possuía cerca de 226.834,1658 ha de área plantada de dendê.

A maioria dos projetos de produção de dendê com vinculação de pequenos agricultores rurais tiveram início a partir de políticas do governo federal, precipuamente após a implantação do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), em 2004, e Programa de Produção Sustentável de Óleo de Palma, em 2010 (NAHUM; SANTOS E SANTOS, 2020).

Foram celebrados 1.137 contratos com agricultores de 2010 até maio de 2016 nos municípios de Acará, Aurora do Pará, Baião, Bujaru, Cametá, Castanhal, Concórdia do Pará, Capitão Poço, Garrafão do Norte, Igarapé-açu, Irituia, Mãe do rio, Mocajuba, Moju, São Domingos do Capim, Tailândia e Tomé-açu, segundo dados do Banco da Amazônia S/A (NAHUM; SANTOS, 2017).

Sendo parte do descrito cenário do dendê na Amazônia, a Bacia Hidrográfica do Rio Arauaí, objeto de estudo desta pesquisa, é situada na região do Alto Moju, que corresponde a 64% da área do município de Moju (NAHUM; SANTOS, 2017) e abriga

comunidades de agricultores familiares que fazem parte de projetos de produção de dendê do Grupo Agropalma, sendo uma região considerada consolidada com a plantação de dendezeiros pertencentes à empresa Agropalma desde os anos 80 (ALMEIDA, 2015).

As questões direcionadoras deste trabalho são: Primeiramente, quais são as principais mudanças no uso e cobertura da terra nos períodos pré-PPSOP (1999-2010) e pós-PPSOP (2010-2020) na Bacia Hidrográfica do Rio Arauaí? Se houve expansão do dendê na bacia, ela evoluiu dentro dos objetivos estabelecidos no Programa de Produção Sustentável de Óleo de Palma preservando a floresta nativa e zelando pelo desmatamento zero? Quais classes de uso da terra foram convertidas em plantações de dendê?

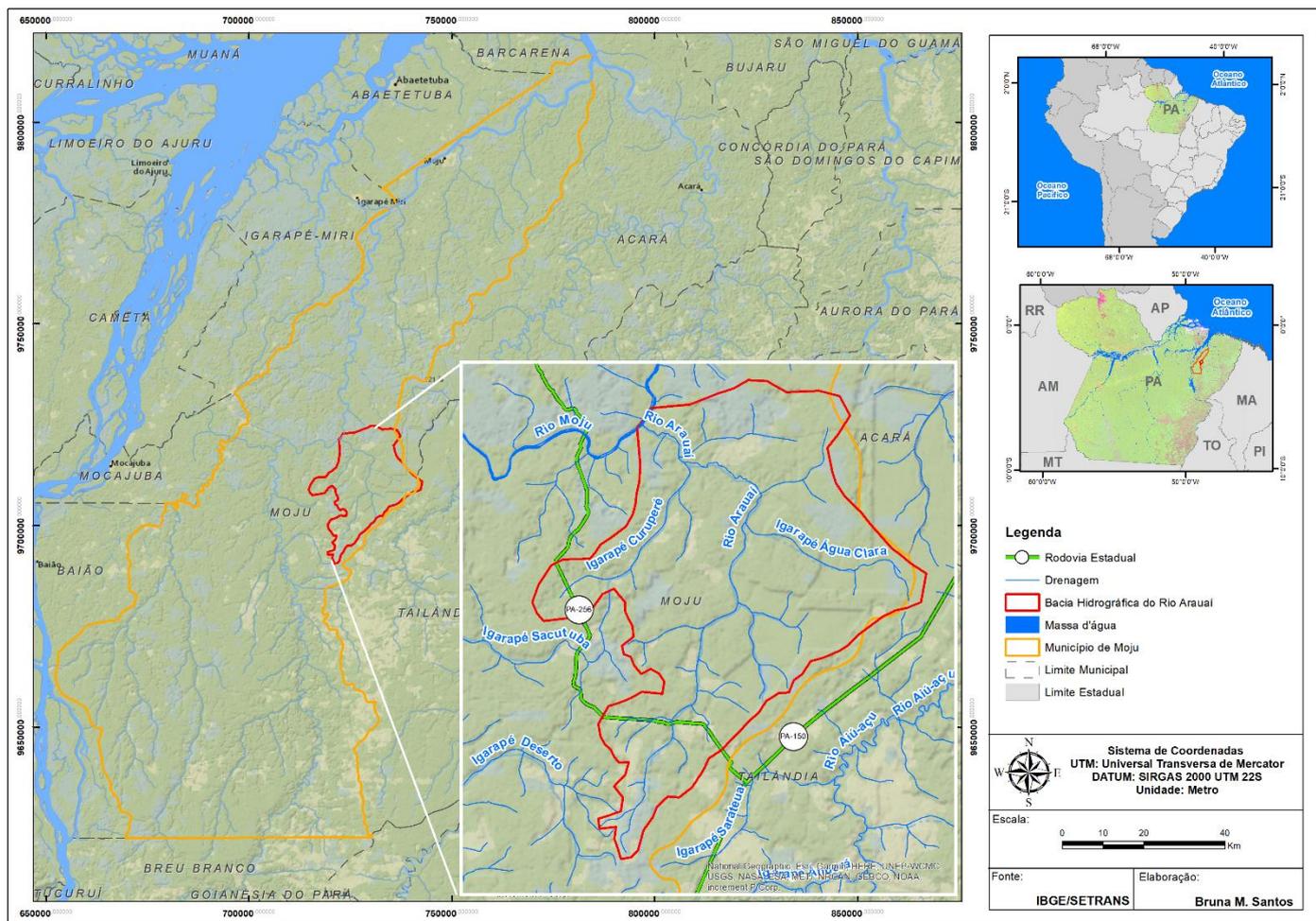
## **2.2 Material e Métodos**

### **2.2.1 Área de Estudo**

A Bacia Hidrográfica do Rio Arauaí (BHRA), localizada na mesorregião do nordeste do estado do Pará, microrregião de Tomé-Açu (2°29'15,13"S/48°55'15,43"W" e 2°48'1,23"S/49°00'16,55"W) na Amazônia Brasileira, tem cerca de 419 km<sup>2</sup> (41.900 ha) de área total. Sob o clima tropical, a região da bacia é marcada por altas temperaturas (média de aproximadamente 28° C), e precipitação anual entre 1800 – 2500 mm, com um período chuvoso de novembro a abril e período seco de maio a outubro. De acordo com a classificação de Köppen (1948) a Bacia do Arauaí enquadra-se em Af – Clima equatorial, com precipitação média de pelo menos 60 mm em cada mês.

A drenagem da área de estudo é feita pelo Rio Arauaí e seus afluentes, os igarapés: Curuperé e Água Clara. Segundo Almeida (2015), as estradas vicinais não pavimentadas advindas a partir da PA-150 tornam possível a mobilidade no local. O número de habitantes é aproximadamente 5.200 distribuídos nas nove vilas que fazem parte da bacia. A Figura 1 apresenta a localização geográfica da Bacia Hidrográfica do Rio Arauaí.

Figura 1. Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Arauaí



### 2.2.2 Análise dos dados

Para atender aos objetivos desta pesquisa, foi elaborada uma análise espaço-temporal da BHRA nos anos de 1999, 2010 e 2020. Para isso, foram adquiridas gratuitamente do site da *United States Geological Survey*, imagens dos satélites Landsat 5, Landsat 7 e Landsat 8, sensores *Thematic Mapper (TM)*, *Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)* e *Operational Land Imager (OLI)*, respectivamente. As imagens datam de julho a setembro, todas imageadas no período mais seco da Amazônia, quando a cobertura de nuvens é menor sobre a área de estudo. Foram utilizadas as imagens das bandas do visível e infravermelho próximo/médio dos sensores para a geração das composições coloridas (R5G4B3 – Landsat 5 e 7, R6G5B4 – Landsat 8), com resolução espacial de 30m. No caso das imagens Landsat 7 e 8, as composições coloridas foram fusionadas com a banda 8 (pancromática) dos sensores sendo assim reamostradas para 15m de resolução espacial.

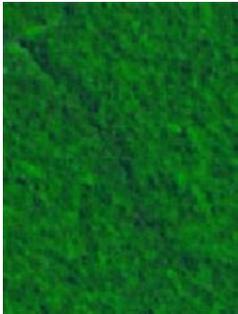
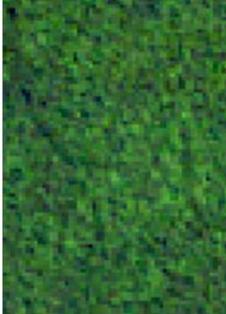
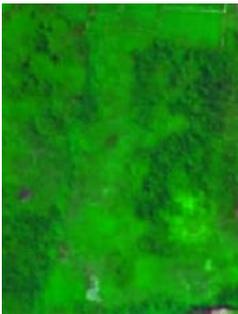
As imagens passaram por processamento digital prévio no software Envi 5.3 e posterior classificação supervisionada. A classificação supervisionada pode ser definida como o processo de usar amostras de identidade conhecida para classificar pixels de identidade desconhecida. Neste tipo de classificação, o analista tenta identificar áreas específicas que representem exemplos homogêneos dessas feições (RIBEIRO, 2004). A classificação supervisionada foi feita pelo método da Máxima Verossimilhança (MAXVER), que, basicamente, estabelece a probabilidade de uma célula pertencer a cada um dos conjuntos de classes pré-definidos, sendo atribuída à célula a classe de mais elevada probabilidade (NOVO, 1992; EASTMAN, 1999).

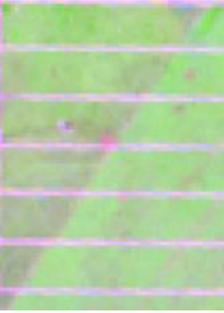
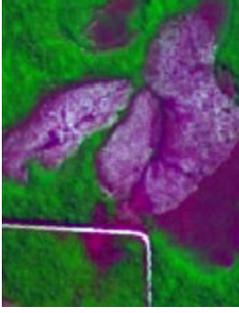
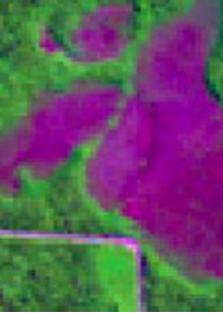
As imagens de satélite foram classificadas usando recursos visuais e técnicas de inspeção consistentes com outras análises regionais de uso da terra, como o TerraClass, projeto de referência em classificação do uso do solo para a Amazônia (COUTINHO et al. 2013; INPE, 2021). Além disso, foram adquiridas imagens da Constelação Planet do ano de 2020 com alta resolução espacial (4,7 metros) para análise confirmatória da classificação de uso e cobertura através da coleta de 100 amostras aleatórias e como ferramenta acessória para confirmação da classe de dendeicultura foi consultado o Cadastro Ambiental Rural (CAR) nos locais onde foi identificada esta classe. Para fins de análise confirmatória dos anos de 1999 e 2010, para algumas áreas foi possível utilizar imagens de alta resolução disponíveis no Google Earth. Também foi utilizada a

Plataforma do Projeto Mapbiomas e sítio do Sistema de Análise Temporal da Vegetação (SatVeg) (EMBRAPA, 2021) como auxílio para análise da acurácia da classificação.

Foram identificadas 7 classes, sendo estas: Floresta Primária, Vegetação Secundária, Dendeicultura, Campinarana, Agropecuária, Solo Exposto e Água. As classes encontram-se caracterizadas na Tabela 1, abaixo:

Tabela 1. Caracterização das classes de cobertura e uso da terra identificadas

| <b>Classes de Uso e Cobertura da Terra</b>  | <b>Sensor OLI<br/>Composição RGB<br/>LANDSAT 8 (2020)</b>                           | <b>Sensor ETM +<br/>Composição RGB<br/>LANDSAT 7 (2010)</b>                          | <b>Sensor ETM<br/>Composição RGB<br/>LANDSAT 5 (1999)</b>                             |
|---|---|--|---|
| <p><b>Floresta Primária (Vegetação Nativa)</b><br/>Feição correspondente às áreas de floresta pouco ou não antropizada (SHINZATO, JACQUES e CAVEDON, 2000) apresentando diferentes estratos. Suas características são a cor verde escuro, textura muito rugosa.</p>   |   |   |   |
| <p><b>Vegetação Secundária</b><br/>Feição correspondente a áreas onde houve intervenção humana para o uso da terra, seja com finalidade mineradora, agrícola ou pecuária, descaracterizando a vegetação primária (IBGE, 2012). Possui coloração verde variando do claro ao escuro, forma irregular e textura pouco lisa a rugosa.</p> |  |  |  |

|   |   |  |   |
|---|---|--|---|
| <p><b>Dendeicultura/Palma de Óleo (Agricultura Perene)</b></p> <p>Feição relativa as áreas de dendê. Possui tons de verde dependendo da idade da plantação, textura lisa a pouco rugosa e com formas regulares bem definidas (talhões e estradas) (SILVA, 2018).</p>  |    |    |    |
| <p><b>Agropecuária</b></p> <p>Feição correspondente a áreas de uso agropecuário onde não foi possível distinguir entre pastagem e agricultura. Possui coloração de verde claro a rosa, textura lisa a pouco rugosa e com formas regulares bem definidas</p>   |   |   |   |
| <p><b>Campinarana</b></p> <p>Feição relacionada com tipo de vegetação que ocorre adaptado ao solo Espodossolo. Ocorrem em áreas planas e alagadas, e apresentam fisionomia bastante variada, desde formações campestres até florestais, com árvores finas (IBGE, 2012). Possui cor roxa com bordas na cor verde claro, textura lisa e com formas irregulares.</p> |  |  |  |
| <p><b>Solo Exposto</b></p> <p>Feição relacionada a áreas não vegetadas, locais urbanizados como vilas e vicinais (estradas) e de solo nu. Possui tonalidade existente entre o vermelho e o azul, como, por exemplo, o lilás e o púrpura.</p>  |  |  |  |

Após o processamento da metodologia de identificação das classes nas imagens de satélite foi calculado o índice KAPPA da classificação para cada um dos anos.

Ao obter a exatidão global de 91,13% e o índice de Kappa de 0,87 para a classificação do ano de 2020, exatidão global de 90,85% e o índice de Kappa de 0,87 para a classificação do ano de 2010 e exatidão global de 91,27% e o índice de Kappa de 0,88 para a classificação do ano de 1999, percebe-se por esses altos valores que a classificação é excelente (Tabela 2). O resultado reflete número suficiente de amostras utilizadas para a classificação.

Tabela 2. Índice de qualidade Kappa

| <b>Kappa</b> | <b>Qualidade</b> |
|--------------|------------------|
| <0,00        | Péssima          |
| 0,00 – 0,20  | Ruim             |
| 0,21 – 0,40  | Razoável         |
| 0,41 – 0,60  | Boa              |
| 0,61 – 0,80  | Muito Boa        |
| 0,81 – 1,00  | Excelente        |

Fonte: Landis e Koch (1977)

### 2.2.3 Análise de Paisagem

Para uma análise mais aprofundada da paisagem da área, foram calculadas métricas de paisagem (Tabela 3) para a classe de floresta primária com o shape resultante da classificação de uso e cobertura da terra. A extensão V-Late 2.0 do ArcGis foi utilizada para o cálculo das métricas.

Mendes, Santos e Guedes (2021) dizem que a paisagem se constitui como uma das categorias que estão no centro da análise da ciência geográfica assim como as transformações feitas pelo homem e os naturais ocorridas no espaço geográfico. Forman e Godron (1986) concluíram que ao estudarmos a paisagem devemos considerar três características principais, que são elas: sua estrutura, formada por uma matriz (elemento predominante), fragmentos e corredores; sua função, relacionada às interações entre os elementos que a compõem e sua dinâmica, alterações em sua estrutura e função ao longo do tempo.

Algumas métricas selecionadas utilizadas em análise da paisagem foram empregadas nesta pesquisa (Tabela 3) para fornecer um entendimento sobre a dinâmica da paisagem dos remanescentes florestais ao longo da linha temporal avaliada relacionada à mudança de uso e cobertura da terra. O objetivo da aplicação das métricas foi principalmente avaliar a ocorrência ou não de fragmentação ou isolamento das áreas de florestas dentro da bacia hidrográfica e como as manchas evoluíram ao longo do tempo em termos de tamanho, forma e proximidade. A avaliação desses aspectos é importante pois essas alterações da paisagem tendem a causar efeitos deletérios como perturbações de habitats e perda de recursos pelas espécies que ali habitam, redução da dispersão e colonização, redução de cruzamentos, diminuição populacional, deriva genética, endocruzamentos, aumento do efeito de borda e a redução de biodiversidade (MUCHAILH et al., 2010). Viana (1990) conceituou fragmento florestal como qualquer área com vegetação, interceptada por elementos naturais ou antrópicos como lagos, rios, estradas, plantações, dentre outros) que tem capacidade de alterar a dinâmica do meio, a exemplo do fluxo de fauna, pólen ou sementes.

Uma forma de análise da fragmentação de paisagens é justamente através da aplicação de métricas de paisagem pois possuem aplicações de destaque na quantificação do crescimento ou da expansão da fragmentação da paisagem (CACHOEIRA et al., 2020). Uma das consequências diretas da fragmentação da paisagem é o efeito de borda que tem como característica ser um fenômeno capaz de reduzir ainda mais os fragmentos. O efeito de borda pode adentrar a área do fragmento por muitos metros influenciando em diversos processos ecológicos (RIBEIRO; MARQUES, 2005). As mudanças das áreas de borda provocam alterações no meio abiótico, como a umidade, o microclima, incidência de ventos, e radiação solar. As transformações que se impõe ao meio físico provocam variações diretas no meio biótico, que correspondem à mudança de distribuição e densidade de indivíduos de uma mesma espécie (ETTO et al., 2013).

As métricas escolhidas para aplicar na presente pesquisa são: *Mean Shape Index* (MSI), *Mean Perimeter-Area Ratio* (MPAR), Índice de Dimensão Fractal (MFRAC), Número de Fragmentos (NF), *Total Edge* (TE), *Edge Density* (ED) e *Mean Proximity Index* (MPI).

Nas relações perímetro-área, o Índice de Dimensão Fractal (MFRAC) também é muito utilizado. Mandelbrot (1977, 1982) tendo cunhado o termo “fractal” conceituou-o

como uma forma geométrica que mostra estrutura em todas as escalas espaciais, e sugeriu um método perímetro-área para calcular a dimensão fractal de formas planares naturais. Este método quantifica o grau de complexidade das formas planares.

A *Mean Perimeter-Area Ratio* (MPAR) diz respeito a uma medida simples da complexidade da forma, mas sem padronização para uma forma euclidiana (por exemplo, quadrado). A aplicação dessa métrica como índice de forma mostra que ela varia com o tamanho da mancha. Ou seja, mantendo a forma constante, um aumento no tamanho do mancha causará uma diminuição na razão perímetro-área. Assim, o índice é igual a 1 para manchas quadradas de qualquer tamanho e aumenta à medida que a mancha se torna cada vez mais não quadrada (ou seja, mais complexa geometricamente) (MCGARIGAL, 2015).

*Mean Shape Index* (MSI) é igual ao perímetro da mancha (m) dividido pela raiz quadrada da área mancha (m<sup>2</sup>) ajustado por uma constante para tornar um padrão quadrado (MCGARIGAL, 2015).

A métrica *Total Edge* (TE) e *Edge Density* (ED) compreende, respectivamente, ao comprimento total (m) e à densidade (m/ha) da borda de um determinado tipo de mancha (nível de classe) ou de todos os tipos de manchas (nível de paisagem) (MCGARIGAL, 2015). Número de Fragmentos (NF) diz respeito ao número de manchas desconectadas de determinada classe na paisagem.

O *Mean Proximity Index* (MPI) considera o tamanho e proximidade de todas as manchas da mesma classe que a mancha focal cujas bordas estão dentro de um raio de pesquisa especificado (MCGARIGAL, 2015), no caso da presente pesquisa foi utilizado 500 metros de raio. As métricas empregadas podem ser verificadas na Tabela 3.

Tabela 3. Métricas da paisagem obtidas ao nível de classe

| Métrica                                    | Descrição  | Fórmula   |
|--|--|---|
| <b>Mean Perimeter-Area Ratio (MPAR)</b>    | é igual à razão entre o perímetro da mancha (m) e a área (m) (MCGARIGAL, 2015).  | $\frac{p_{ij}}{a_{ij}}$   |
| <b>Mean Shape Index (MSI)</b>              | é igual ao perímetro da mancha (m) dividido pela raiz quadrada da área mancha (m <sup>2</sup> ) ajustado por uma constante para tornar um padrão quadrado (MCGARIGAL, 2015).   | $\frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{p_i}{2\sqrt{\pi \cdot a_i}} \right)}{n}$ |
| <b>Índice de Dimensão Fractal (MFRACT)</b> | é igual a 2 vezes o logaritmo do perímetro da mancha (m) dividido pelo logaritmo da área da mancha (m <sup>2</sup> ); o perímetro é ajustado para corrigir o desvio raster no perímetro (MCGARIGAL, 2015).                                     | $\frac{2 \ln (.25 p_{ij})}{\ln a_{ij}}$                                   |
| <b>Total Edge (TE)</b>                     | é igual à soma dos comprimentos (m) de todos os segmentos de borda envolvendo o tipo de patch correspondente (MCGARIGAL, 2015).  | $\sum_{k=1}^m e_{ik}$   |
| <b>Edge Density (ED)</b>                   | é igual à soma dos comprimentos (m) de todos os segmentos de borda envolvendo o tipo de mancha correspondente, dividida pela área total da paisagem (m <sup>2</sup> ), multiplicada por 10.000 (para converter em hectares) (MCGARIGAL, 2015). | $\frac{\sum_{k=1}^m e_{ik}}{A} (10,000)$                                  |
| <b>Mean Proximity Index (MPI)</b>          | é igual à soma da área da mancha (m <sup>2</sup> ) dividida pela distância borda a borda mais próxima ao quadrado (m <sup>2</sup> ) entre a mancha e a mancha focal de todos as manchas do tipo correspondentes cujas                          | $\sum_{s=1}^n \frac{a_{ijs}}{h_{ijs}^2}$                                  |

---

bordas estão dentro de  
uma distância especificada  
(m) da mancha focal  
(MCGARIGAL, 2015).

---

### 2.3 Resultados e Discussão

Comparando a área total de dendê plantada em 2020 na estação seca com a área de 2010 constata-se que 3108 ha foram convertidos em dendê durante os dez anos que se seguiram à implementação do PPSOP em 2010 (Tabela 4). Esta quantidade de terreno representa pouco menos da expansão do dendê que ocorreu em 1999–2010 período pré-PPSOP (3131,45 ha). Entre todos os anos (1999–2020), ~41% das áreas de denzeiros foram estabelecidos a partir de floresta primária; ~31% de vegetação secundária; ~19% de áreas de agropecuária e 9% de solo exposto.

Tabela 4. Tipos de uso da terra convertidos diretamente para dendê nos onze anos anteriores e dez anos posteriores ao lançamento do PPSOP

|                              | Pré-PPSOP 1999-2010 |          | Pós-PPSOP 2010-2020 |          |
|------------------------------|---------------------|----------|---------------------|----------|
|                              | ha                  | %        | ha                  | %        |
| Floresta Primária            | 1054,94             | 33,69    | 364,07              | 11,71    |
| Vegetação Secundária         | 834,64              | 26,66    | 1158,28             | 37,26    |
| Agropecuária                 | 798,13              | 25,49    | 1535,36             | 49,42    |
| Solo Exposto                 | 442,65              | 14,13    | 44,67               | 1,43     |
| Campinarana                  | 1,09                | 0,03     | 5,62                | 0,18     |
| Expansão                     | 3131,45             | 100      | 3108                | 100      |
| Óleo de palma desde o início | 5582,57             | -        | 8412,98             | -        |
| <b>Total</b>                 | <b>8714,02</b>      | <b>-</b> | <b>11520,98</b>     | <b>-</b> |

Durante os onze anos iniciais (1999-2010), a área cultivada com dendê cresceu cerca de 32%. A floresta primária serviu como fonte dominante (>33%) de conversão em dendê, antes do lançamento do PPSOP em 2010 como podemos ver na Tabela 4. Depois do lançamento do PPSOP, a fonte dominante de conversão passou a ser as áreas de agropecuária (>49%). Embora a quantidade de floresta intacta convertida diretamente para óleo de palma fosse diferente de zero, a quantidade diminuiu entre os dois períodos.

No período pós-PPSOP, a conversão direta de floresta primária compreendeu <12% (364,07 ha) de área de expansão de óleo de palma em comparação com >33% (1054,94 ha) no período pré-PPSOP (Tabela 4). Além disso, enquanto apenas 364,07 ha de expansão do dendê de 2010-2020 foram em áreas florestadas em 2010, reconstruindo os tipos de uso da terra em 1999 indica que ~250% desse valor ou 1237,08 ha de

floresta intacta, passou por conversão intermediária para classes de agropecuária, solo exposto ou vegetação secundária até 2010, e então foi convertida em dendê.

Em resumo, a conversão direta de floresta nativa para a dendeicultura foi menor no período pós-PPSOP. Apesar disto, mais de mil hectares de floresta primária passou por conversão intermediária antes de ser convertida em plantações de dendê até 2020. Esses resultados estão de acordo com os encontrados com aqueles encontrados por Benami et al. (2018) quando constatou a conversão intermediária no nordeste paraense.

Vijay et al. (2016) ressalta em seu estudo que o que se caracteriza como dendê sem desmatamento pode depender do ano de referência, ou seja, na realidade, quanto mais atrás a linha de base analítica começa, percebemos que existe pouco dendê 'livre de desmatamento'.

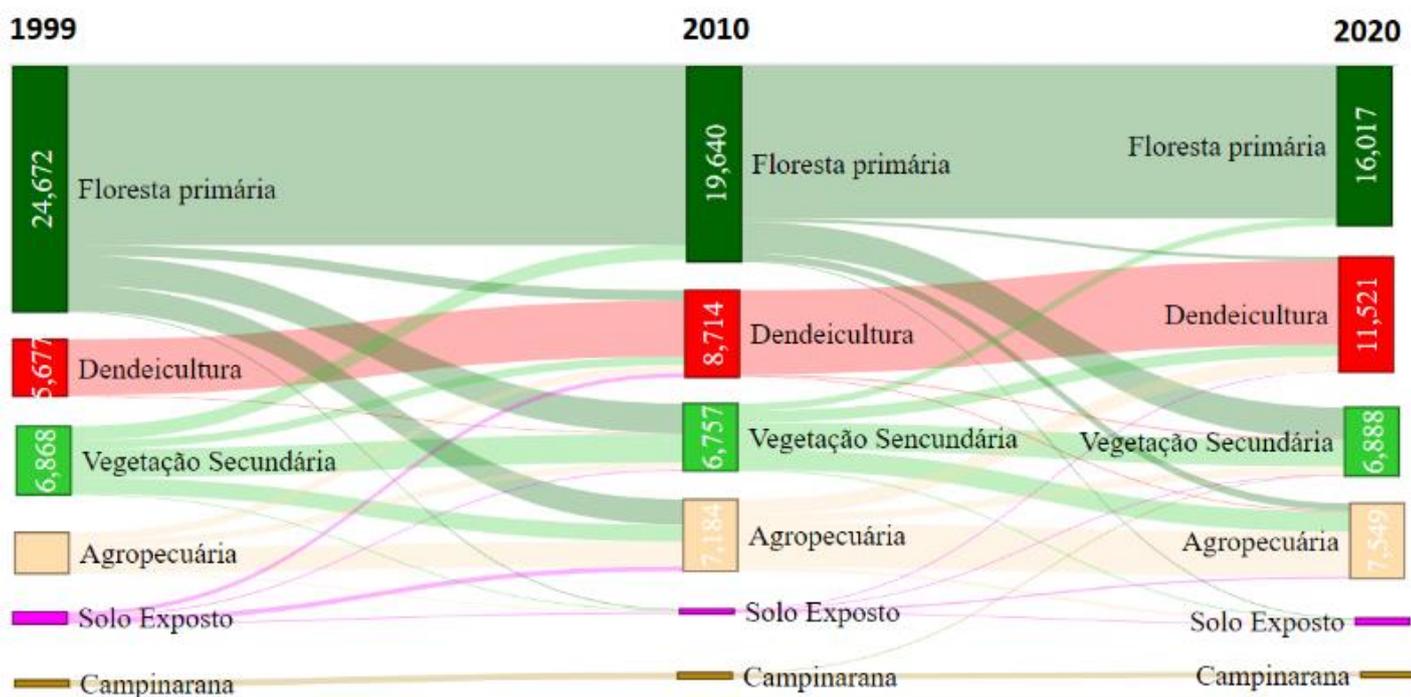
Os resultados também indicam que apesar da conversão de floresta primária ter sido reduzida no período pós-PPSOP, ainda contrasta com os objetivos de desmatamento zero da política de produção sustentável. Não obstante, a quantidade de vegetação secundária convertida em cultura de dendê aumentou de 26% no período pré-PPSOP para 37% no período pós-PPSOP (Tabela 4), concordando com estudos anteriores nos quais 15%-90% da expansão ocorreu pela conversão de florestas secundárias, agroflorestas e florestas intactas (GUTIERREZ-VELEZ et al. 2011, WICKE et al., 2011, GUNARSO et al., 2013, MARGONO et al., 2014, VIJAY et al., 2016, FURUMO; AIDE, 2017).

Por meio da análise conjunta da classificação da mudança de uso e cobertura da terra da bacia feita nesta pesquisa e do banco de dados do Cadastro Ambiental Rural dos municípios de Moju e Tailândia foi observado que a soma das áreas de floresta dentro das reservas legais (RL) e Áreas de Proteção Permanente (APP) na BHRA em 2020 compreendia 14.672,77 ha ao passo que a área total de floresta primária era de 16.017,00 ha, ou seja, a maior parte das áreas preservadas com vegetação nativa (floresta primária) na bacia tem proteção legal do Código Florestal Brasileiro, restando poucos hectares disponíveis para conversão em outros usos. A partir deste fato podemos questionar se de fato a redução da conversão de floresta primária foi impulsionada pela implementação da PPSOP ou se a razão para isto foi o esgotamento da conversão legal de áreas fora da RL de propriedades rurais e APP.

Outro ponto importante é que no período pós-PPSOP a conversão direta para dendê de áreas ocupadas com agropecuária quase dobrou indo de 798,13 ha para

1535,36 ha. Na Figura 2 é possível visualizar os fluxos de modificação de uso e cobertura da terra ao longo dos anos.

Figura 2. Trajetórias do uso da terra de 1999–2020. O diagrama de sankey descreve as trajetórias de uso da terra de 1999 a 2020. Cada linha representa uma trajetória única apresentada na análise. A altura da barra representa a área em hectares tendo a vírgula como separador de milhar. A espessura de cada linha horizontal representa a área por parcela.



Na classificação do ano de 2020 é possível perceber o aparecimento de polígonos menores de dendê, principalmente na porção esquerda da bacia (Figura 3), esses polígonos provavelmente dizem respeito a pequenos proprietários de terra agricultores familiares em sua maioria conveniados com grandes empresas de dendê.

Segundo Nahum (2020), a dendeicultura tem causado um fenômeno na Amazônia e este é planejado e estruturado pela ação do Estado. Esse fenômeno tem gerado uma modificação no espaço rural que se molda de forma a reproduzir o capital, e como consequência ocorre a transformação da paisagem, configuração espacial e relações sociais onde se estabelecem as plantações de dendê. O mesmo autor conclui que há uma dinâmica importante entre a instância política e a espacial, pois sem os planos e programas estatais essa atividade rural não chegaria à condição de agronegócio.

Figura 3. Uso e cobertura da terra dos anos 1999, 2010 e 2020 na Bacia Hidrográfica do Rio Arauaí

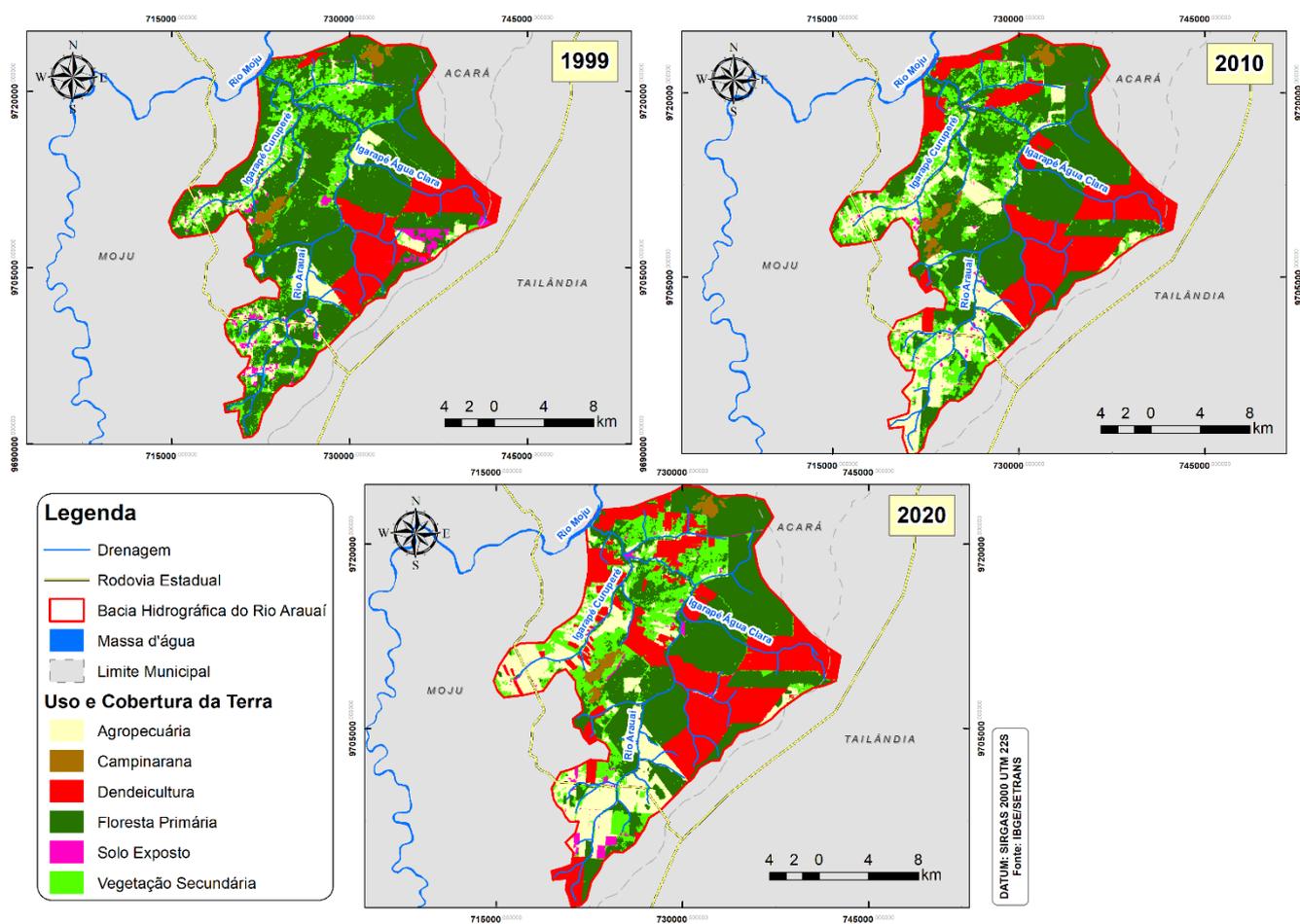


Tabela 5. Métricas de paisagem referentes a análise da forma das manchas

|      | FLORESTA |      |        |
|------|----------|------|--------|
|      | MSI      | MPAR | MFRACT |
| 1999 | 1,60     | 0,04 | 1,34   |
| 2010 | 1,73     | 0,03 | 1,34   |
| 2020 | 1,75     | 0,04 | 1,36   |

Através das métricas de paisagem podemos fazer uma análise mais pormenorizada do comportamento das manchas de floresta ao longo do período analisado.

Em relação à forma da paisagem (Tabela 5), o índice Mean Shape Index (MSI) da classe floresta primária foi de 1,60 em 1999 para 1,75 em 2020 revelando que as manchas florestais com o passar dos anos ficaram cada vez mais complexas, com formas mais irregulares.

Em relação ao tamanho médio das manchas, pode-se verificar que para áreas florestais, o índice de Mean Perimeter-Area Ratio (MPAR), foi de 0,03 em 2010 para 0,04 em 2020, o que significa uma relação área interna/área externa mais baixa e, portanto, menos relação com os efeitos externos. Segundo Silva e Souza (2014), é importante esclarecer que mesmo apresentando formas irregulares, os fragmentos maiores ficam sob menores efeito de borda do que os pequenos efetivamente devido ao seu tamanho.

O Índice de Dimensão Fractal (MFRACT) evidenciou um discreto aumento na complexidade das bordas dos fragmentos florestais ao longo dos anos indo de 1,34 em 1999 e 2010 para 1,36 em 2020, porém no geral, estes números ainda traduzem que tais fragmentos demonstram pouca complexidade em suas bordas, tendendo a apresentar formas regulares, o que evidencia a forte presença humana na paisagem da bacia. Burrough (1981) e Krummel et al. (1987) sugeriram que as paisagens antrópicas exibem padrões mais simples do que as paisagens naturais, quando mensuradas através da dimensão fractal, ou seja, as paisagens mais perturbadas por ações antrópicas, apresentam formas mais linearizadas do que as paisagens com características naturais, que apresentam formas irregulares.

Tabela 6. Métricas de paisagem referentes a análise da borda das manchas

|      | FLORESTA |            |       |
|------|----------|------------|-------|
|      | NF       | TE         | ED    |
| 1999 | 278      | 1204580,18 | 48,8  |
| 2010 | 218      | 987117,64  | 50,23 |
| 2020 | 307      | 848580,27  | 52,21 |

O Total Edge (TE) métrica que mede o comprimento total de borda em metros, das manchas de floresta, demonstram que houve uma redução nesse comprimento indo de 1.204.580 em 1999 para 848.580 em 2020 (Tabela 6), e quanto menores forem os valores do comprimento total de borda, menor será a fragmentação da paisagem. Apesar do TE ter diminuído de valor, podemos notar que o número de fragmentos (NF) de floresta aumentou, fato que pode ser explicado pela perda de áreas de floresta e concomitantemente fragmentação dessas áreas remanescentes, o que afeta o comprimento total da borda e aumento do número de fragmentos de menor área.

Conforme McGarigal (1995), a quantidade total de borda em uma paisagem é importante para muitos fenômenos ecológicos pois em muitas investigações ecológicas da paisagem, muito da suposta importância do padrão de espacialidade está relacionado aos efeitos de borda.

O Edge Density (ED), ou densidade de borda, para as manchas florestais, foi aumentando com o passar dos anos, tendo valor de 48,8 em 1999 e chegando a 52,2 em 2020 (Tabela 6). Braga et al. (2019), ressalta que quanto maior for o valor da densidade de borda, maior será o efeito de borda, sendo prejudicial às espécies que vivem nesta paisagem. Analisando de forma conjunta o comprimento de borda (TE) e a densidade de borda (ED), nota-se que TE diminui de valor enquanto que ED aumentou, isso pode ser explicado pela perda de áreas florestais para a agropecuária, dendeicultura e aquelas que foram desmatadas e evoluíram para vegetação secundária, de tal forma que com menos quantidade de manchas de florestais, o comprimento de borda tende a diminuir consequentemente porém ao olharmos a densidade de borda vemos que a mesma vem aumentando com o passar dos anos, isto indica que a floresta está sendo cada vez mais fragmentada nesta paisagem. De acordo com Braga et al. (2019) é importante enfatizar que quanto mais longe o fragmento está da forma básica, mais bordas ele possui, o que pode promover o efeito de borda na paisagem.

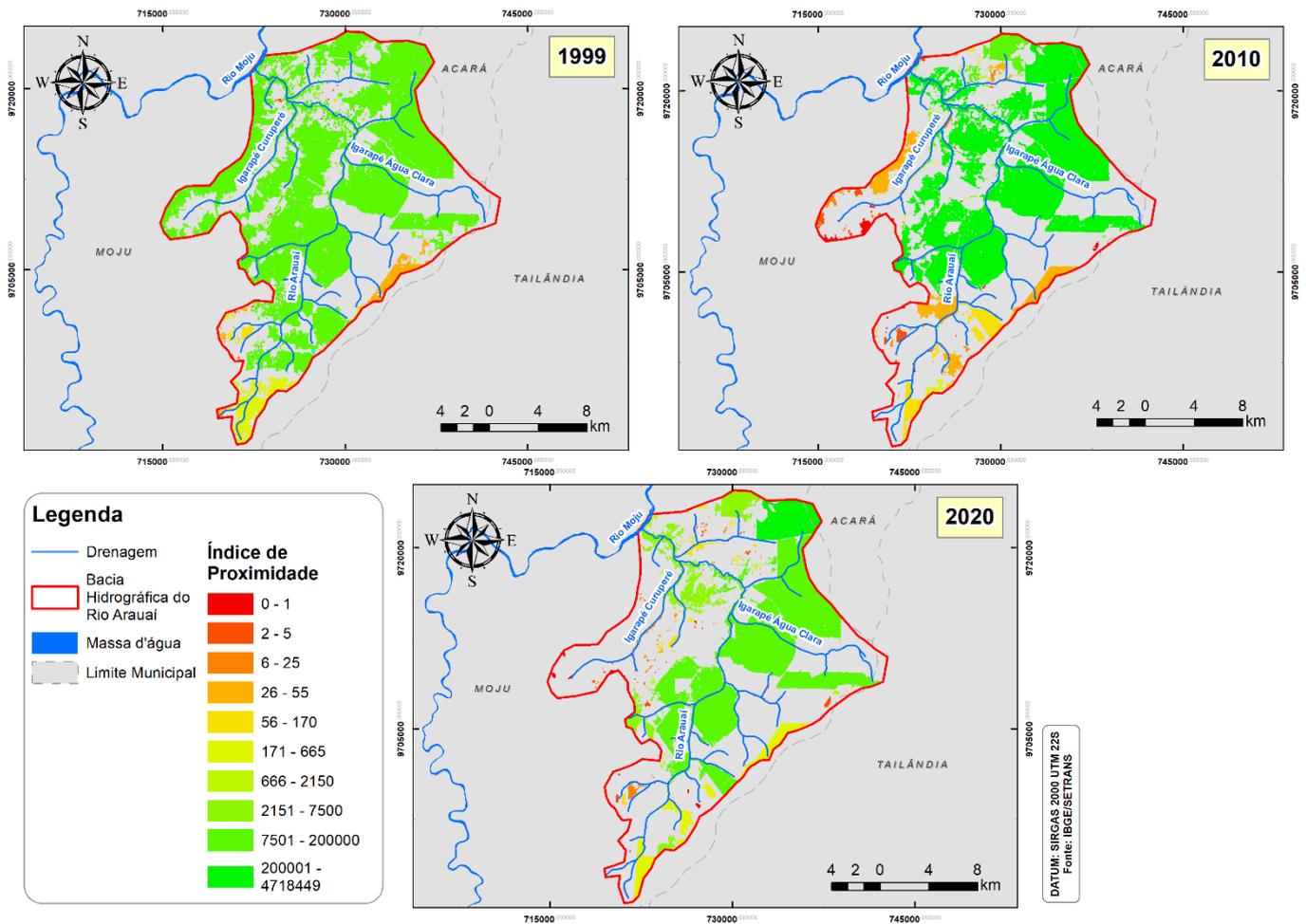
Tabela 7. Índice de proximidade média das manchas (500 m de distância)

| <b>Mean Proximity Index (MPI)</b> |             |             |
|-----------------------------------|-------------|-------------|
| <b>1999</b>                       | <b>2010</b> | <b>2020</b> |
| 43680,81                          | 20693,31    | 6324,18     |

Segundo McGarigal (1995), o Mean Proximity Index (MPI) quantifica o contexto espacial de um fragmento (habitat) em relação aos seus vizinhos da mesma classe; descreve o grau de isolamento espacial das manchas. Para a classe de floresta primária o MPI diminuiu ao longo dos anos, sendo 43.680,8 em 1999 e indo para 6.324,18 em 2020 (Tabela 7), ou seja, as manchas florestais ficaram menos próximas, por conseguinte, mais isoladas ao passar do tempo.

O mapa (Figura 4) demonstra o Índice de proximidade das manchas para a áreas de floresta primária nos anos analisados.

Figura 4. Índice de proximidade da classe de floresta primária na BHRA



## 2.4 Conclusão

A quantidade de área convertidas em dendê foi basicamente a mesma no período pré e pós Programa de Produção Sustentável de Óleo de Palma (PPSOP), a modificação ficou por conta da quantidade de área convertidas de floresta primária para dendê tendo esta diminuído no período pós-PPSOP, tornando-se a agropecuária como principal classe de conversão para a cultura do dendê reiterando a afirmação de Nahum (2020) quando diz que a história da dendeicultura na Amazônia paraense mostra a relação entre ações políticas e reorganização espacial.

Apesar deste fato, muitos hectares 1237,08 ha de dendê em 2020 passaram por conversão intermediária, ou seja, eram floresta primária em 1999 e em 2010 foram convertidas em outro tipo de uso para que finalmente em 2020 fossem convertidas em dendê. É importante ressaltar que a bacia não conseguiu cumprir os objetivos de desmatamento zero propostos pelo programa governamental.

No período pós-PPSOP a conversão de áreas em vegetação secundária e agropecuária aumentaram. Pôde-se notar também o aumento da quantidade de polígonos de dendeicultura com áreas menores (~35 ha) o que pode estar ligado com a maior incorporação dos agricultores familiares à cadeia produtiva do dendê.

As áreas remanescentes de floresta primária em 2020 são constituídas quase que totalmente de áreas de Reserva Legal e Área de Proteção Permanente, o que significa que restaram poucas áreas de floresta primária a serem legalmente convertidas em outros usos. O que nos leva a questionar se a real motivação para a redução da conversão de floresta primária foi impulsionada pela implementação da PPSOP ou se a razão para isto foi o esgotamento da conversão legal de áreas fora da RL de propriedades rurais e APP.

Em relação à análise de paisagem, pelas formas regulares das bordas dos fragmentos florestais pode-se concluir que a bacia já sofreu forte interferência humana. O índice de proximidade dos fragmentos florestais da paisagem da bacia diminuíram substancialmente indo de 43.680,8 em 1999 para 6.324,18 em 2020, indicando uma paisagem com fragmentos de florestas mais isoladas ao longo dos anos.

## Referências

- ALMEIDA, A. S. Mudanças de uso da terra em paisagens agrícolas com palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jacq.) e implicações para a biodiversidade arbórea na Amazônia Oriental. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Belém, 2015.
- BENAMI, E. et al. Oil palm land conversion in Pará, Brazil, from 2006–2014: evaluating the 2010 Brazilian Sustainable Palm Oil Production Program. *Environ. Res. Lett.* 13. 2018.
- BRAGA, T. G. M. et al. Analysis of cultivation of remaining forest fragments in the Moju River Basin, Legal Amazon, Pará. *Biodiversity and Conservation*. 2019.
- BRANDÃO, F; SCHONEVELD, G. The state of oil palm development in the Brazilian Amazon: Trends, value chain dynamics, and business models. Working Paper 198. Bogor, Indonesia: CIFOR. 2015.
- BRANDÃO, F. et al. The challenge of reconciling conservation and development in the tropics: Lessons from Brazil's oil palm governance model. *World Development*. 2021.
- BURROUGH, P. A. The fractal dimensions of landscapes and other environmental data. *Nature*, 274, 240-242. 1981.
- CACHOEIRA, J. N. et al. Dinâmica espacial da paisagem do Parque Estadual do Jalapão (TO) de 2000 a 2015. *Ci. Fl.*, Santa Maria, v. 30, n. 3, p. 755-766, jul./set. 2020.
- CÉSAR, A. D. S.; BATALHA, M. O.; ZOPELARI, A. L. M. S. Oil palm biodiesel: Brazil's main challenges *Energy*. 2013.
- COUTINHO, A. C. et al. Uso e cobertura da terra nas áreas desflorestadas da Amazônia Legal: TerraClass 2008. 1. ed. v. 1. 108p. Brasília-DF, Belém-PA: Embrapa, INPE, 2013.
- EASTMAN, J. R. *Idrisi for Windows*. Versão 2.0. Worcester, MA: Clark university, 1999.
- WICKE, B. et al. Exploring land use changes and the role of palm oil production in Indonesia and Malaysia. *Land Use Policy*. 2011.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Zoneamento agroecológico do dendezeiro para as áreas desmatadas da Amazônia Legal. 2010. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/1248/zoneamento-agroecologico-do-dendezeiro-para-as-areas-desmatadas-da-amazonia-legal>. Acesso em: 15/08/2021.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Satveg. 2021. Disponível em: <https://www.satveg.cnptia.embrapa.br/satveg/login.html>. Acesso em: 19/05/2021.

- ETTO, T. L. et al. Ecologia da paisagem de remanescentes florestais na Bacia Hidrográfica do Ribeirão das Pedras - Campinas-SP. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v.37, n.6, p.1063-1071, 2013.
- FORMAN, R. T. T.; GODRON, M. *Landscape ecology*. New York: John Wiley & Sons, 1986.
- FURUMO, P. R.; AIDE, T. M. Characterizing commercial oil palm expansion in Latin America: land use change and trade. *Environmental Research Letters*. 2017.
- GLASS, V. Expansão do dendê na Amazônia brasileira: elementos para uma análise dos impactos sobre a agricultura familiar no nordeste do Pará. ONG Repórter Brasil. 2013.
- GUNARSO, P. et al. Oil palm and land use change in Indonesia, Malaysia and Papua New Guinea Reports from the Technical Panels of the 2nd Greenhouse Gas Working Group of the Roundtable on Sustainable Palm Oil. Bogor: RSPO. 2013.
- GUTIERREZ-VELEZ, V. H. et al. High-yield oil palm expansion spares land at the expense of forests in the Peruvian Amazon. *Environmental Research Letters*. 2011.
- HERZOG, A. L. Óleo de palma, vilão lá fora, mocinho aqui? *Biodieselbr*. 2011. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/noticias/em-foco/oleo-palma-vilao-fora-mocinho-aqui>. Acesso em: 12/07/2021.
- INSTITUTO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *Manual Técnico da Vegetação Brasileira*. 2ª Edição. Rio de Janeiro, 2012.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. *Dados TerraClass*. Disponível em: [http://www.inpe.br/cra/projetos\\_pesquisas/dados\\_terraclass.php](http://www.inpe.br/cra/projetos_pesquisas/dados_terraclass.php). Acesso em: 01 jun. 2021.
- KÖPPEN, K. *Climatologia: com um estúdio de los climas de la tierra*. México: Fondo de Cultura Economica. 478p. 1948.
- KRUMMEL, J. R. et al. Landscape pattern in a disturbed environment. *Oikos* 48: 321-324. 1987.
- LANDIS, J.R.; KOCH, G.G. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, v. 33, p. 159- 154, 1977.
- MANDELBROT, B. B. *Fractals, Form, Chance and Dimension*. W. H. Freeman and Co., New York. 1977.
- MANDELBROT, B. B. *The Fractal Geometry of Nature*. W. H. Freeman and Co., New York. 1982.
- MARGONO, B. A. et al. Primary forest cover loss in Indonesia over 2000–2012. *Nat. Clim. Change* 4 730–5. 2014.

MCGARIGAL, K. Fragstats: Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure. United States Department of Agriculture. 1995.

MCGARIGAL, K. Fragstats Help. 2015.

MENDES, M. F.; SANTOS, A. C. P.; GUEDES, L. S. Dinâmica da paisagem na microrregião geográfica de Araguaína/TO: subsídios para o planejamento e conservação ambiental. *Revista de Geografia (Recife)* V. 38, No. 2, 2021.

MUCHAILH, M. C. et al. Metodologia de planejamento de paisagens fragmentadas visando a formação de corredores ecológicos. *Floresta*, Curitiba, v. 40, n. 1, p. 147-162, 2010.

NAHUM, J. S.; SANTOS, C. B. Impactos Socioambientais da Dendeicultura em Comunidades Tradicionais na Amazônia Paraense. *ACTA Geográfica*, Boa Vista, Ed. Esp. Geografia Agrária, p.63-80. 2013.

NAHUM, J. S.; SANTOS, C. B. Do sítio camponês ao lote de dendê: transformações do espaço rural na Amazônia paraense no século XXI. *Revista FCT/UNESP*. 2017.

NAHUM J. S.; SANTOS, L. S.; SANTOS, C. B. Formação da Dendeicultura na Amazônia Paraense. *Mercator*, Fortaleza, v.19, e19007, 2020.

NEHER, C. Controverso, plantio de dendê no Brasil triplica em 4 anos. DW. 2014. Disponível em: <https://www.dw.com/pt-br/controverso-plantio-de-dend%C3%AA-no-brasil-triplica-em-4-anos/a-17429621>. Acesso em: 16/06/2021.

NOVO, E. M. L. M. Sensoriamento remoto: princípios e aplicações. São Paulo: Ed. Edgard Blucher Ltda., 1992.

OOSTERVEER, P. Promoting sustainable palm oil: viewed from a global networks and flows perspective. *Journal of Cleaner Production*. 2015.

PIRKER, J et al. What are the limits to oil palm expansion?. *Global Environmental Change*. 2016.

RAMALHO FILHO, A. et al. Zoneamento agroecológico, produção e manejo da cultura de palma de óleo na Amazônia. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2010.

RIBEIRO, R. M. P. Avaliação de métodos de classificação de imagens IKONOS II para o mapeamento da cobertura terrestre. 2004. 53 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2004.

RIBEIRO, S.; MARQUES, J. C. B. Características da paisagem e sua relação concorrência de bugios-ruivos (*Alouatta guariba clamitans* Cabrera, 1940; Primates Atelidae) em fragmentos florestais no vale do Taquari, RS. *Natureza e Conservação*, v.3, n.2, p.65-78, 2005.

SHINZATO, E.; CAVEDON, A. D.; JACQUES, P. D. (Org). Projeto Porto Seguro-Santa Cruz Cabralia: Levantamento de reconhecimento de solos, capacidade de uso das terras e uso do solo e cobertura vegetal. Salvador: CPRM/SA, 2000.

SILVA, M.; SOUZA, R. Spatial patterns of forest fragmentation in the Flona Ibura – Sergipe. *Mercator* 13(3):121–137. 2014.

SILVA, T. C. M. Análise da paisagem e identificação de áreas prioritárias para restauração florestal na bacia do Rio Arauaí, Moju, Pará. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas - Botânica Tropical) - Universidade Federal Rural da Amazônia / Museu Paraense Emílio Goeldi, 2018.

VIANA, V. M. Biologia e manejo de fragmentos florestais atuais. In: CONGRESSO BRASILEIRO FLORESTAL, Anais. Campos do Jordão: SBS/SBEF, 1990. p.113-118.

VIJAY, V. The impacts of oil palm on recent deforestation and biodiversity loss. *Plos One*. 2016.

VILLELA, A. A. et al. Status and prospects of oil palm in the Brazilian Amazon. *Biomass and Bioenergy*. 2014.

## **CAPÍTULO 3 – VULNERABILIDADE AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ARAUAI – MOJU/PA, AMAZÔNIA BRASILEIRA**

### **RESUMO**

Nas últimas décadas a agricultura do dendê tem recebido investimentos massivos visando sua expansão na Amazônia para fins de exploração econômica do óleo de palma. Como resultado dos investimentos, em quase quatro anos, a área ocupada por dendezais no Brasil triplicou. Só o estado do Pará concentrava 95% da área total, como apontou o Ministério do Desenvolvimento Agrário (NEHER, 2014). De modo consequente à sua expansão no nordeste paraense, a dendeicultura resultou em diversos problemas locais como a concentração fundiária, conflitos no campo, risco ambiental sobre os corpos d'água por conta da abertura de estradas e da intensidade de herbicidas, fungicidas, bem como de adubo (NAHUM; SANTOS, 2013). Diante disso, esta pesquisa se propôs a realizar uma análise de vulnerabilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Arauai situada no município de Moju-PA, Amazônia Brasileira. Para o alcance dos objetivos a pesquisa valeu do método Analytical Hierarchy Process (AHP) desenvolvido por Saaty (1980) conjuntamente com o uso de Sistema de Informação Geográfica (SIG) para análise espacial dos indicadores da bacia. A partir dos resultados, foi possível definir áreas de 5 diferentes graus de vulnerabilidade ambiental – Muito Baixo, Baixo, Moderado, Alto e Muito Alto.

Palavras-Chave: Sensibilidade Ambiental. Zoneamento. AHP. SIG.

### **ABSTRACT**

In recent decades, oil palm agriculture has received massive investments aimed at its expansion in the Amazon for the purpose of economic exploitation of palm oil. As a result of the investments, in almost four years, the area occupied by oil palms in Brazil tripled. The state of Pará alone concentrated 95% of the total area, as pointed out by the Ministry of Agrarian Development (NEHER, 2014). As a consequence of the expansion in the northeast of Pará, oil palm cultivation resulted in several local problems such as land concentration, conflicts in the countryside, environmental risk on water bodies due to the opening of roads and the intensity of herbicides, fungicides, as well as fertilizer (NAHUM; SANTOS, 2013). Therefore, this research proposed to carry out an environmental vulnerability analysis of the Arauai River Basin located in the municipality of Moju-PA, Brazilian Amazon. To achieve the objectives, the research used the Analytical Hierarchy Process (AHP) method developed by Saaty (1980) together with the use of the Geographic Information System (GIS) for spatial analysis of basin indicators. From the results, it was possible to define areas of 5 different degrees of environmental vulnerability – Very Low, Low, Moderate, High and Very High.

Keywords: Environmental Sensitivity. Zoning

### 3.1 Introdução

As bacias hidrográficas constituem importante unidade espacial de análise tanto por sua dinâmica como por registrar os impactos associados à extração e ao uso dos recursos naturais. Ao considerarmos sua totalidade e complexidade, são eleitas para estudos ambientais – estrutura e funcionamento de seus subsistemas; avaliações e diagnósticos socioambientais – a fim de contribuir com o ordenamento territorial (SOUZA, 2013; CARVALHO, 2014).

Rodriguez, Silva e Leal (2011) acentuam que o planejamento das bacias hidrográficas vem se alterando conceitualmente, primeiro com o enfoque no manejo de águas, depois com uma concepção da bacia como a conjunção de fatores ambientais e, mais recentemente, com uma visão de planejamento ambiental integrado.

Ao longo da história recente, as bacias hidrográficas amazônicas têm sido submetidas a pressões antrópicas acentuadas e na perspectiva socioeconômica, a bacia do rio Arauá faz parte do cenário descrito por Becker (2009) para o nordeste paraense, onde foram observadas as mudanças contundentes em decorrência da abertura da rodovia Belém-Brasília e de outras estradas construídas para o acesso a essa rodovia, que ocasionou uma maior mobilidade de pessoas e mercadorias a partir da década de 1960. Essa região configura-se como uma das mais antigas áreas de ocupação da Amazônia, sendo a iniciante nos grandes projetos econômicos do estado (BORDALO et al., 2012; FERREIRA; LIMA; CORRÊA, 2017).

O panorama atual traz para esse espaço o cultivo do dendê, que a partir do lançamento do Zoneamento Agroecológico do Dendê e do Programa de Produção Sustentável de Óleo de Palma, em 2010, o dendê (ou palma) passou a receber investimentos mais vultosos, principalmente no estado do Pará - maior estado produtor (GLASS, 2013).

Como resultado dos investimentos, em quase quatro anos, a área ocupada por dendezais no Brasil triplicou: os 50 mil hectares de 2010 saltaram para 160 mil hectares em 2014. Só o estado do Pará concentrava 95% dessa área, aponta o Ministério do Desenvolvimento Agrário (NEHER, 2014). Em 2021, segundo dados da Associação Brasileira de Produtores de Óleo de Palma (Abrapalma), o Pará já possuía cerca de 226.834 hectares de área plantada de dendê.

A expansão da dendeicultura no nordeste paraense resultou em diversos problemas locais como a concentração fundiária, conflitos no campo, risco ambiental sobre os corpos d'água por conta da abertura de estradas e da intensidade de herbicidas, fungicidas, bem como de adubo (NAHUM; SANTOS, 2013).

Diante disso, esta pesquisa se propõe a realizar uma análise de vulnerabilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Arauá situada no município de Moju-PA, Amazônia Brasileira. A análise de vulnerabilidade ambiental permite avaliar o risco de sistemas ambientais sofrerem impactos frente a determinadas pressões. Essa informação é útil no planejamento ambiental, possibilitando identificar regiões onde a degradação ambiental resultante de uma dada ação tem potencial de causar maior impacto e desenvolver programas visando à redução das fontes de pressão (FIGUEIRÊDO et al., 2010).

O conceito de vulnerabilidade ambiental a ser utilizado nesta pesquisa será o que consta em Grigio (2003) e Costa (2006), ou seja, a vulnerabilidade ambiental como o risco de determinado ambiente sofrer impactos negativos levando em consideração aspectos intrínsecos do mesmo decorrentes de características naturais como declividade, temperatura e corpos hídricos (vulnerabilidade natural) somada às intervenções antropogênicas no ambiente, dadas, principalmente, pela mudança de uso e cobertura da terra.

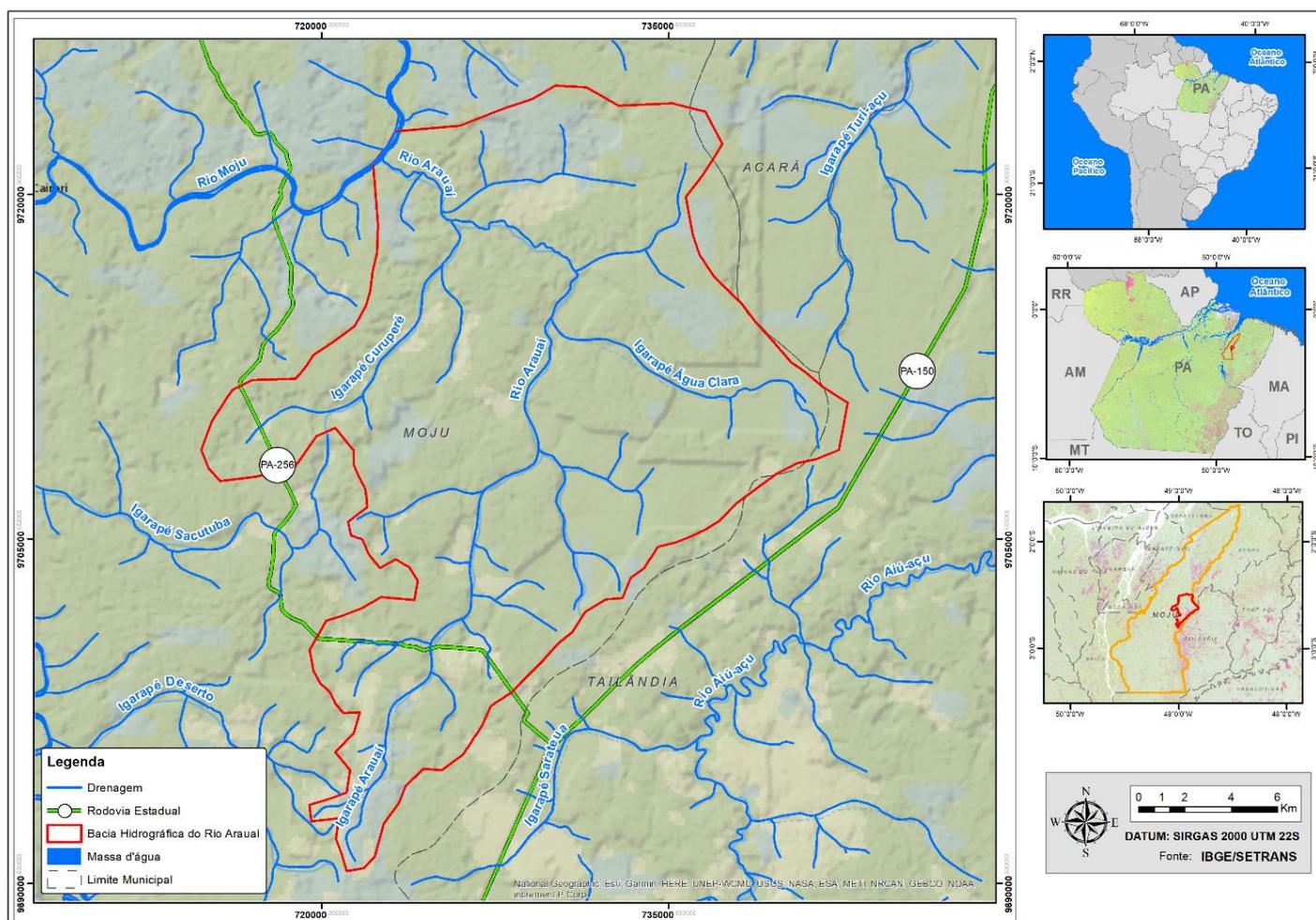
### **3.2 Material e métodos**

#### **3.2.1 Área de estudo**

A Bacia Hidrográfica do Rio Arauá (BHRA), localizada na mesorregião do nordeste do estado do Pará, microrregião de Tomé-Açu ( $2^{\circ}29'15,13''S/48^{\circ}55'15,43''W$  e  $2^{\circ}48'1,23''S/49^{\circ}00'16,55''W$ ) na Amazônia Brasileira (Figura 5), tem cerca de 419 km<sup>2</sup> (41.900 ha) de área total e está dentro dos limites do município de Moju, representando aproximadamente 5% do município (9.094,10 km<sup>2</sup>). Sob o clima tropical, a região da bacia é marcada por altas temperaturas (média de aproximadamente 28° C), e precipitação anual entre 1800 – 2500 mm, com um período chuvoso de novembro a abril e período seco de maio a outubro. De acordo com a classificação de Köppen (1948) a Bacia do Arauá enquadra-se em Af – Clima equatorial, com precipitação

média de pelo menos 60 mm em cada mês. A drenagem da área de estudo é feita pelo Rio Arauaí e seus afluentes, os igarapés: Curuperé e Água Clara. Segundo Almeida (2015), as estradas vicinais não pavimentadas advindas a partir da PA-150 tornam possível a mobilidade no local. O número de habitantes é aproximadamente 5.200 distribuídos nas nove vilas que fazem parte da bacia.

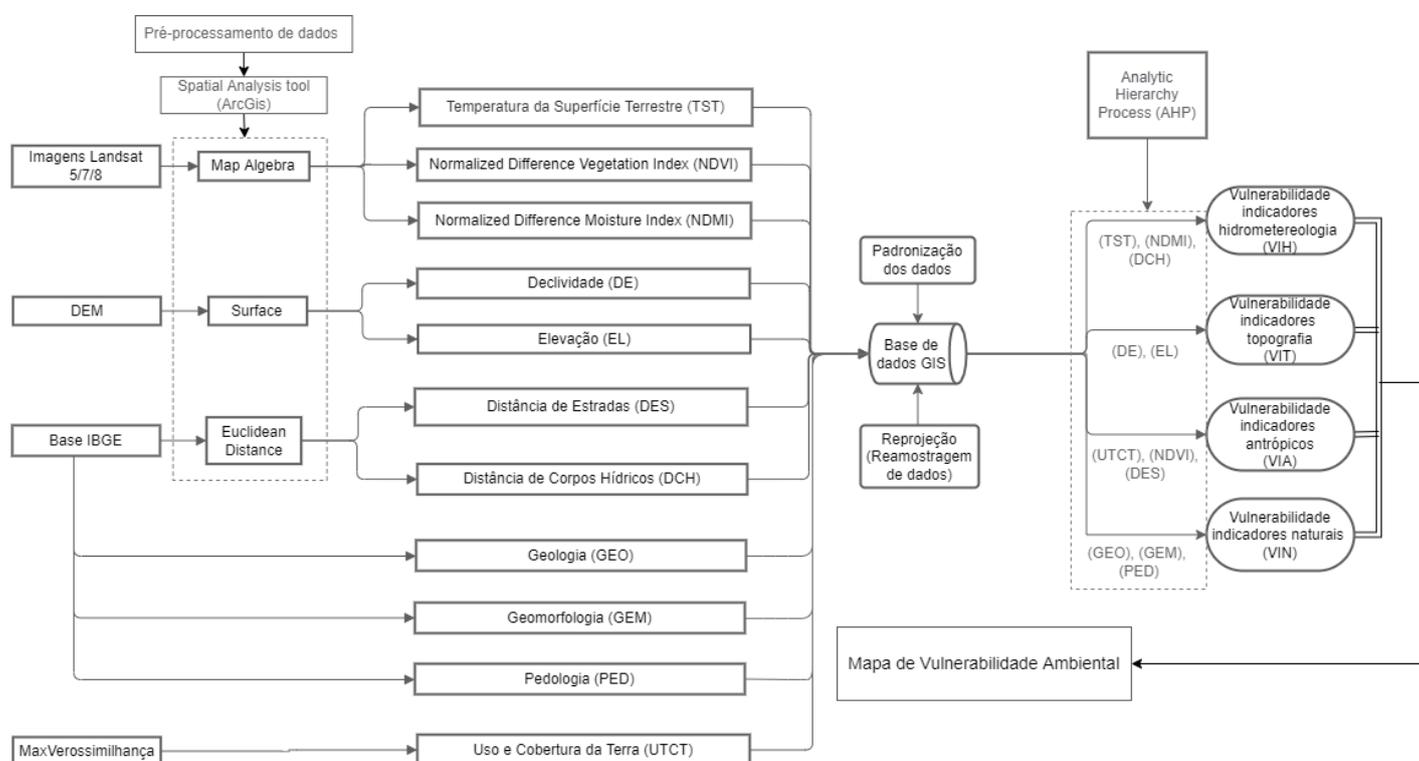
Figura 5. Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Arauaí



### 3.2.2 Análise de dados

A metodologia utilizada nesta pesquisa foi baseada principalmente nos trabalhos de Grigio (2003), Oliveira (2011), Nguyen et al. (2016) e Liou; Nguyen e Li (2017). A seguir, na Figura 6, encontra-se uma síntese em forma de fluxograma da metodologia aplicada.

Figura 6. Representação esquemática da metodologia de avaliação de vulnerabilidade ambiental



Fonte: Modificado e adaptado de Wei et al. (2020)

### 3.2.3 Aquisição de Dados e Processamento

Para a construção do índice de vulnerabilidade foram utilizadas variáveis classificadas em 4 grupos diferentes de fatores: antrópicos, hidrometeorológicos, topográficos e naturais. Imagens produtos dos satélites LANDSAT 8 (sensores OLI/TIRS) do ano de 2020 foram utilizadas para obter informações dos diversos indicadores utilizados para o estabelecimento do índice de vulnerabilidade ambiental. Foi necessário o uso das bandas do visível e infravermelho próximo/médio dos sensores

para a geração das composições coloridas, com resolução espacial de 30m. Com o intuito de estimar a temperatura de superfície para o ano de 2020 foi utilizada a imagem do infravermelho termal dos sensores TIRS (banda 10) com intervalo espectral de 10.6 - 11.19 $\mu$ m, e resolução espacial de 100m (reamostrada para 30m).

O período preferencial de coleta das imagens foi o seco (menos chuvoso) na Amazônia (junho a outubro) pois é o período em que a área apresenta menor quantidade de nuvens, e assim, os sensores dos satélites conseguem captar imagens da superfície sem tanta interferência.

Para o levantamento de informações de uso e cobertura da terra foi executado mapa de classificação conduzido através do programa ENVI 5.3 pela metodologia de MaxVer (Máxima Verossimilhança) em projeção SIRGAS 2000. Foram identificadas 7 classes, sendo estas: Floresta Primária, Vegetação Secundária, Dendeicultura, Campinarana, Agropecuária, Solo Exposto e Água. Após do processamento da metodologia de identificação das classes na imagem de satélite foi calculado índice KAPPA da classificação.

### 3.2.4 Temperatura da Superfície da Terra (TST)

O cálculo da TST sem correção atmosférica para o Landsat-8 a partir da conversão dos níveis de cinza da banda 10 em radiância espectral (TOA) foi feito através da equação 1 segundo recomendado pela USGS (2016).

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L \quad \text{eq. 1}$$

Onde  $L_{\lambda}$  é a radiância espectral (W/(m<sup>2</sup>\*sr\* $\mu$ m)),  $M_L$  é o fator multiplicativo de redimensionamento da banda,  $Q_{cal}$  é o valor quantizado e calibrado do pixel em nível de cinza (DN),  $A_L$  é o fator aditivo de redimensionamento da banda.

A radiância espectral será convertida em temperatura a partir da equação abaixo. As constantes térmicas da banda 10 do Landsat 8 serão obtidas no arquivo de metadados (Equação 2).

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)} \quad \text{eq. 2}$$

Onde  $T$  é a temperatura sem correção atmosférica (Kelvin),  $K_1$  é a constante de calibração 1,  $K_2$  é a constante de calibração 2,  $L_\lambda$  é a radiância espectral ( $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ ).

### 3.2.5 Normalized Difference Moisture Index (NDMI)

O índice NDMI foi desenvolvido por Gao (1996). Nele, a intenção é ser um método capaz de medir o teor de água líquida presente na vegetação, ou seja, a umidade. Nesta pesquisa o NDWI de Gao (1996) será utilizado com a nomenclatura NDMI (*Normalized Difference Moisture Index*). O método é calculado pela equação 3.

$$NDMI = \frac{Nir - SWIR}{Nir + SWIR} \quad \text{eq. 3}$$

Onde *Nir* é a banda do infravermelho próximo (banda 5) e *SWIR* é a banda do infravermelho médio (banda 6 do Landsat 8).

### 3.2.6 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

O NDVI é um índice de vegetação sensível da quantidade e condição da vegetação, cujos valores variam no intervalo de -1 a 1. O valor do NDVI varia entre os diferentes tipos de cobertura da terra de acordo com a refletância no espectro vermelho e no espectro infravermelho próximo (ZOU; YOSHINO, 2017). Pode ser calculado por meio da equação 4. Onde *Nir* é a refletância espectral da banda do infravermelho próximo (banda 5) e *R* é a refletância espectral da banda do vermelho (banda 4).

$$NDVI = \frac{Nir - R}{Nir + R} \quad \text{eq. 4}$$

### 3.2.7 Variáveis Topográficas

As variáveis topográficas – elevação e declividade – foram extraídas da base de dados altimétricos do projeto Topodata (BRASIL, 2008) do INPE com resolução

espacial de 30 m. Para área de estudo será utilizada uma cena SRTM (02S495), sendo 02S495ZN para elevação e 02S495SN para declividade.

### 3.2.8 Padronização dos Indicadores

A padronização dos indicadores foi executada por meio da ferramenta de reclassificação (*Reclassify*) do software ArcGis, utilizando quebras naturais. Os indicadores foram divididos em 5 classes, sendo a classe 1, característica menos vulnerável e classe 5, característica mais vulnerável.

### 3.2.9 Análise Estatística

Uma variedade de métodos tem sido desenvolvidos para avaliar vulnerabilidade como: lógica de Fuzzy (YANG; CHEN, 2015), análise relacional cinza (SAHOO; DHAR; KAR, 2016), método da entropia (ZHAO et al., 2018), AHP (NGUYEN; LIOU, 2019) e análise de componente principal (ABDI; WILLIAMS, 2010; ZOU; YOSHINO, 2017; WEI et al., 2020)

O AHP do inglês *Analytical Hierarchy Process* (AHP) tem sido utilizado como método de análise de vulnerabilidade ambiental em diversos trabalhos conceituados como Nguyen et al. (2016) que analisaram uma região de 5.054 km<sup>2</sup> na região central do Vietnã. Shao et al. (2016) fizeram uma análise regional da bacia hidrográfica do rio Xianshui de 26.079 km<sup>2</sup> na China. Nguyen e Liou (2019) executaram um mapeamento global da vulnerabilidade eco-ambiental de humanos e perturbações da natureza. Moeinaddini et al. (2010) avaliaram a adequação de um local como aterro sanitário para resíduos sólidos urbanos em Karaj (Irã) também utilizando o método AHP.

O AHP foi desenvolvido por Saaty (1980) e aperfeiçoado por Bhushan e Rai (2004). Souza et al. (2013) explicaram que o AHP envolve a identificação de problemas de tomada de decisão e, em seguida, os decompõe em uma hierarquia de "subproblemas" menores e mais simples, em que cada subproblema pode ser analisado de forma independente, sem que perca questões-chave de tomada de decisão. De acordo com a importância relativa na Tabela 8, pesos são atribuídos aos critérios. Com base na importância relativa, por meio de comparação ponto a ponto, a escala de número

absoluto de Saaty é usada para avaliar alternativas, onde valores quantitativos e qualitativos são atribuídos ao julgamento (SOUZA et al., 2013).

Tabela 8. Definição e explicação dos 9 pesos fundamentais de julgamento comparativo

| <b>Intensidade de Importância</b> | <b>Definição</b>                                   | <b>Explicação</b>  |
|-----------------------------------|--|--|
| 1                                 | Mesma Importância                                  | As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.  |
| 3                                 | Importância pequena                                | A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra.                                     |
| 5                                 | Importância grande ou essencial                    | A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra.                                    |
| 7                                 | Importância muito grande                           | Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra; sua dominação de importância é demonstrada na prática. |
| 9                                 | Importância absoluta                               | A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza.                                 |
| 2, 4, 6, 8                        | Valores intermediários entre os valores adjacentes | Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.   |

Fonte: Saaty (1991)

O AHP é uma metodologia matemática destinada a ponderar quantitativamente variáveis mediante a interação do pesquisador com o modelo matemático e fazer isso em forma de considerações qualitativas (RAFFO, 2012).

O AHP é um dos métodos de avaliação mais amplamente encontrado em trabalhos científicos devido à sua estrutura simples de lidar com decisões complexas com eficácia. O procedimento AHP envolve a seleção de variáveis na hierarquia de tomada de decisão para que as comparações entre os pares na matriz sejam possíveis, atribuindo um peso a cada variável. Avaliações subjetivas são convertidas em valores numéricos classificados em uma escala numérica (SAATY, 1980; BHUSHAN; RAI, 2004).

Após derivar 11 variáveis de interesse dos diferentes 4 fatores descritas na Tabela 9, a avaliação de vulnerabilidade será realizada para os anos de 2020 com a ajuda do processo de AHP e SIG usando as equações 10 e 11 conforme Liou; Nguyen e Li (2017).

$$VA = \sum_1^4 B_i * W_i \quad \text{eq. 10}$$

$$B_i = \sum_1^{nB_i} C_i * w_i \quad \text{eq. 11}$$

Onde VA é a vulnerabilidade ambiental,  $B_i$  é o fator determinante de grupo,  $W_i$  é o peso dos fatores determinantes de grupo,  $C_i$  é o indicador,  $w_i$  é o peso da variável e  $nB_i$  é o número de variáveis no fator determinante de grupo  $B_i$ .

Tabela 9. Fatores e variáveis usadas no cálculo de vulnerabilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Arauaí

| Fatores ( $B_i$ )                             | Indicadores ( $C_i$ )                          | Descrição   | Fonte do Dados   |
|---|--|---|--|
| <b><math>B_1</math></b><br>Hidrometeorológico | $C_1$ NDMI                                     | Índice capaz de estimar o teor de água líquida presente na vegetação, ou seja, a umidade.                         | Imagem Landsat 8 path/row 224/062, data: 06/08/2020  |
|   | $C_2$ TST                                      | Método capaz de estimar a temperatura de superfície terrestre.  | Imagem Landsat 8 path/row 224/062, data: 06/08/2020  |
|   | $C_3$ Distância de Corpos Hídricos             | Indicador que mede a distância euclidiana a partir das drenagens dos corpos hídricos da bacia.                    | Imagem Landsat 8 path/row 224/062, data: 06/08/2020 / Shape de Drenagem do IBGE referente ao ano de 2017           |
| <b><math>B_2</math></b> Antrópico             | $C_4$ Distância de Estradas                    | Indicador que mede a distância euclidiana a partir das estradas (pavimentadas ou não).                            | Imagem Landsat 8 path/row 224/062, data: 06/08/2020 / Shape de Estradas do SETRANS                                 |
|   | $C_5$ CTUT (Cobertura da Terra e Uso da Terra) | Método capaz de evidenciar os diferentes usos e coberturas da terra.  | Imagem Landsat 8 path/row 224/062, data: 06/08/2020. Classificação Máxima Verossimilhança feita pelo software Envi |
|   | $C_6$ NDVI                                     | Índice sensível da quantidade e condição da vegetação, cujos valores variam no intervalo de -1 a 1.               | Imagem Landsat 8 path/row 224/062, data: 06/08/2020.   |
| <b><math>B_3</math></b> Natural               | $C_7$ Pedologia                                | Trata de aspectos relacionados com a identificação, a formação, a classificação e o mapeamento dos solos da área. | IBGE / Escala 1:250.000  |
|   | $C_8$ Geologia                                 | Apresenta informações sobre as formações geológicas presentes no local.   | IBGE / Escala 1:250.000  |
|   | $C_9$ Geomorfologia                            | Mostra a estrutura das formas de relevo da área de estudo.  | IBGE / Escala 1:250.000  |

|                                  |                                   |  |  |
|----------------------------------|-----------------------------------|--|--|
| <b>B<sub>4</sub></b> Topográfico | <b>C<sub>10</sub></b> Elevação    | Representa a elevação de um terreno através de cores, geralmente utiliza-se um sistema de graduação de cores.  | Modelo Digital de Elevação feitos com dados altimétricos do projeto Topodata do INPE com resolução espacial de 30 m. |
|                                  | <b>C<sub>11</sub></b> Declividade | Método que revela a declividade do terreno, dada pela inclinação da superfície do terreno em relação à horizontal, ou seja, a relação entre a diferença de altura entre dois pontos e a distância horizontal entre esses pontos. | Modelo Digital de Elevação feitos com dados altimétricos do projeto Topodata do INPE com resolução espacial de 30 m. |

Fonte: Modificado e adaptado de Nguyen et al. (2016).

A separação dos indicadores em 4 agrupamentos diferentes foi feita com base em Nguyen et al. (2016), Liou; Nguyen e Li (2017), Nguyen; Liou (2019) e Wei et al. (2020) de acordo com a natureza de cada um deles.

O fator hidrometeorológico é composto pelos seguintes indicadores:

- 1- **NDMI** que é usado para determinar o conteúdo de água na vegetação (USGS, 2020)
- 2- **TST** que evidencia a temperatura da superfície terrestre, podendo esta ser alterada devido a mudanças no uso e ocupação do solo, configurando, assim interferência no solo, vegetação e na paisagem local (PEREIRA et al. 2012).
- 3- **Distância de Corpos Hídricos** que evidenciará a proximidade à rede de drenagem da região, que é o fator-chave que afeta a sobrevivência e o desenvolvimento da bacia (WEI et al., 2020).

O fator antrópico é composto pelos seguintes indicadores:

- 1- **Distância de Estradas** que mostrará a proximidade com as estradas e deve ser levada em consideração para a avaliação da vulnerabilidade, porque a poluição, como a exaustão de combustíveis fósseis do congestionamento do tráfego, pode ser gerada nas estradas (NGUYEN et al., 2016). Além do fato de que as estradas podem destruir a estrutura original do terreno (WEI et al., 2020) e a Amazônia ter um histórico consolidado de desmatamento no entorno de estradas (TROMBULAK; FRISSELL, 2000; FORMAN et al., 2003; FEARNSSIDE, 2007).

- 2- **CTUT (Cobertura da Terra e Uso da Terra)** é um método capaz de evidenciar os diferentes usos e coberturas da terra. Segundo Aguiar (2003), as questões ambientais relacionadas a mudanças no uso/cobertura do solo são bem conhecidas. Em termos regionais, a autora cita poluição do ar e da água, degradação do solo, desertificação, eutrofização de corpos d'água, acidificação, assim como as questões de perda de biodiversidade. Em nível local, problemas de erosão, sedimentação, contaminação e extinção de espécies. Em termos socioeconômicos, a autora afirma que as mudanças de uso do solo afetam as estruturas de emprego, produtividade da terra, qualidade de vida, etc.
- 1- **NDVI** que consiste em um indicador sensível da quantidade e condição da vegetação, cujos valores variam no intervalo de -1 a 1. A vegetação é um importante componente ecológico. Segundo Shimabukuro (1998), o NDVI é muito utilizado na estimativa de biomassa, na estimativa de cobertura vegetal e na detecção de mudanças de padrão de uso e cobertura da terra.

O fator topográfico é composto pelos seguintes indicadores:

- 1- **Elevação** que desempenha um papel importante na definição da condição topográfica, determinando as características da superfície da terra, como radiação solar recebida, tipos de árvore e potencial exposição a perigos como deslizamentos de terra e secas (NGUYEN; LIOU, 2019).
- 2- **Declividade** que revela a declividade do terreno, dada pela inclinação da superfície do terreno em relação à horizontal, ou seja, a relação entre a diferença de altura entre dois pontos e a distância horizontal entre esses pontos. Os mapas de declividade emergem como produto de vital importância, uma vez que objetiva demonstrar as inclinações de uma dada área em relação a um eixo horizontal, servindo como fonte de informações para as formas de relevo, aptidões agrícolas, riscos de erosão, restrições de uso e ocupação urbana, entre outros (RAMALHO FILHO; BEEK, 1995).

O fator natural é composto pelos seguintes indicadores:

- 1- **Geologia** que apresenta informações sobre as formações geológicas que formam o local estudado, desde a sua formação até as possíveis alterações que experimentou na sua estrutura ao longo dos anos.
- 2- **Geomorfologia** mostra a estrutura das formas de relevo da área de estudo. Tais estruturas são formadas pela ação de elementos da superfície como o clima e fatores exógenos e pela natureza das rochas, e por fatores endógenos (INPE, 2022).
- 3- **Pedologia** trata de aspectos relacionados com a identificação, a formação, a classificação e o mapeamento dos solos da área (SBCS, 2022).

O peso de cada fator obtido a partir do fator de ponderação da matriz foi multiplicado por sua classe de peso. Na construção da matriz de comparação pareada, a consistência dos julgamentos pode ser revelada de forma a conferir se a matriz é uma matriz consistente. O índice usado para isto é conhecido como índice de consistência (CR), e este é usado para indicar a probabilidade de a matriz de julgamentos ter sido gerada de forma aleatória (equação 11).

$$CR = CI/RI \quad \text{eq. 11}$$

Onde RI é a média do índice de consistência resultante dependendo da ordem da matriz dada por Saaty (1977) e CI é o índice de consistência que pode ser expresso com a equação 12.

$$CI = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1) \quad \text{eq. 12}$$

Onde  $\lambda_{\max}$  é o maior ou principal autovalor da matriz e pode ser calculado a partir da matriz, e n é a ordem da matriz.

CR será calculado para todos os modelos onde o AHP for usado. Os valores de CR devem ser maiores que 0,1 para que sejam considerados, caso contrário serão descartados.

As equações utilizadas para a elaboração do mapa de vulnerabilidade ambiental, já com seus devidos pesos atribuídos para a BRHA foram as seguintes:

$$VIH = (0,309x[TST] + 0,582x[DCH] + 0,109x[NDMI]) \quad \text{eq.13}$$

$$VIA = (0,122x[NDVI] + 0,23x[DES] + 0,648x[UTCT]) \quad \text{eq.14}$$

$$VIN = (0,122x[GEM] + 0,23x[GEO] + 0,648x[PED]) \quad \text{eq.15}$$

$$VIT = (0,667x[DE] + 0,333x[EL]) \quad \text{eq.16}$$

$$VA = (0,232x[VIN] + 0,089x[VIT] + 0,489x[VIA] + 0,19x[VIH]) \quad \text{eq.17}$$

### **3.3 Resultados e discussão**

Os quatro grupos de fatores (hidrometeorológico, antrópico, natural e topográfico) foram calculados usando o ArcGIS. Os resultados foram classificados em cinco níveis baseados no método de classificação de quebras naturais: muito baixa, baixa, moderada, alta, muito alta (Smith et al., 2015).

#### **3.3.1 Vulnerabilidade do Fator Hidrometeorológico**

A distribuição espacial da vulnerabilidade do fator hidrometeorológico composta pelos indicadores: Distância de Corpos Hídricos, NDMI e Temperatura da Superfície Terrestre, e obtida através da eq.13, é mostrada na Figura 7.

Figura 7. Distribuição espacial de vulnerabilidade para o fator hidrometeorológico

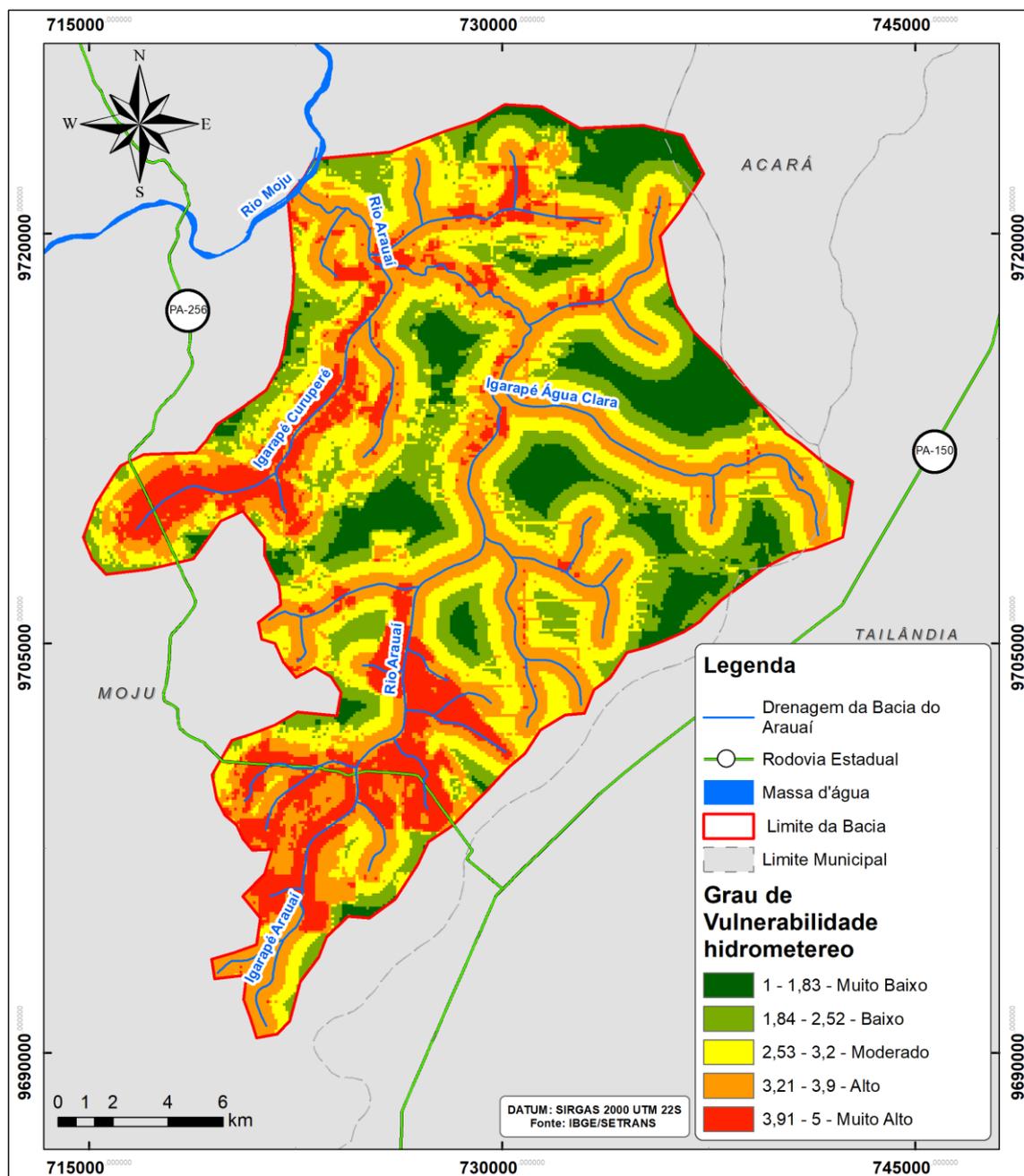
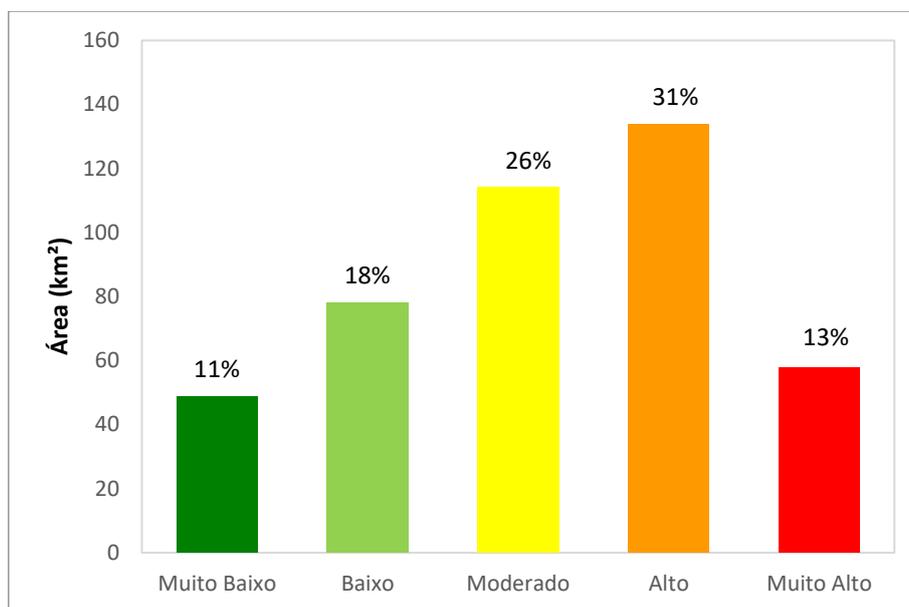


Figura 8. Quantitativo de área dos cinco níveis de vulnerabilidade hidrometeorológica. O gráfico de barras representa a área percentual de cada nível.



A análise da Figura 7 e da Figura 8 revela que as áreas de maior grau de vulnerabilidade (Muito Alto) correspondem a apenas 13% da área da bacia e se concentram na porção a oeste e sul da bacia, influenciadas conjuntamente: 1) pela proximidade maior com corpos hídricos pois os rios fornecem acesso fácil aos recursos hídricos, que é o fator-chave que afeta a sobrevivência e o desenvolvimento da bacia, por isso, qualquer que seja o impacto ambiental, quanto mais perto dos rios eles ocorrerem mais propensa à degradação esta bacia se encontrará, 2) pelas altas temperaturas da superfície da terra (TST) que podem levar à perda de umidade do solo, compactação, diminuição da infiltração das precipitações, erosão, dentre outras consequências e 3) pelo NDMI indicando um baixo grau de umidade na vegetação. As áreas mais vulneráveis do fator hidrometeorologia equivalentes a 57,77 km<sup>2</sup> da área da bacia coincidiram precipuamente com áreas antropizadas, de agropecuária e solo exposto.

### 3.3.2 Vulnerabilidade do Fator Antrópico

A distribuição espacial da vulnerabilidade do fator antrópico composta pelos indicadores: Distância de Estradas, NDVI e Mudança de Uso e Cobertura da Terra, e obtida através da eq.14, é mostrada na Figura 9.

Figura 9. Distribuição espacial de vulnerabilidade para o fator antrópico

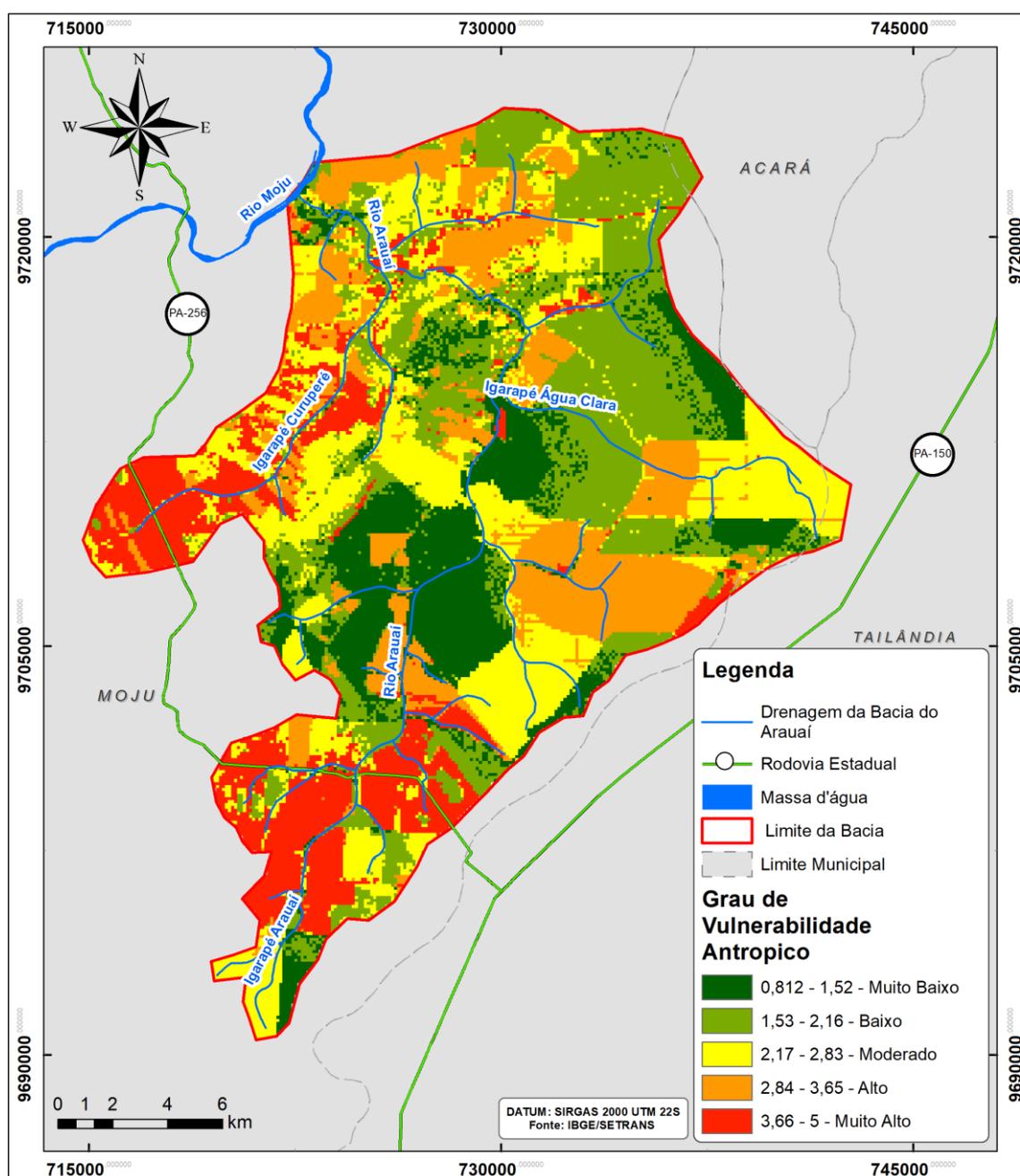
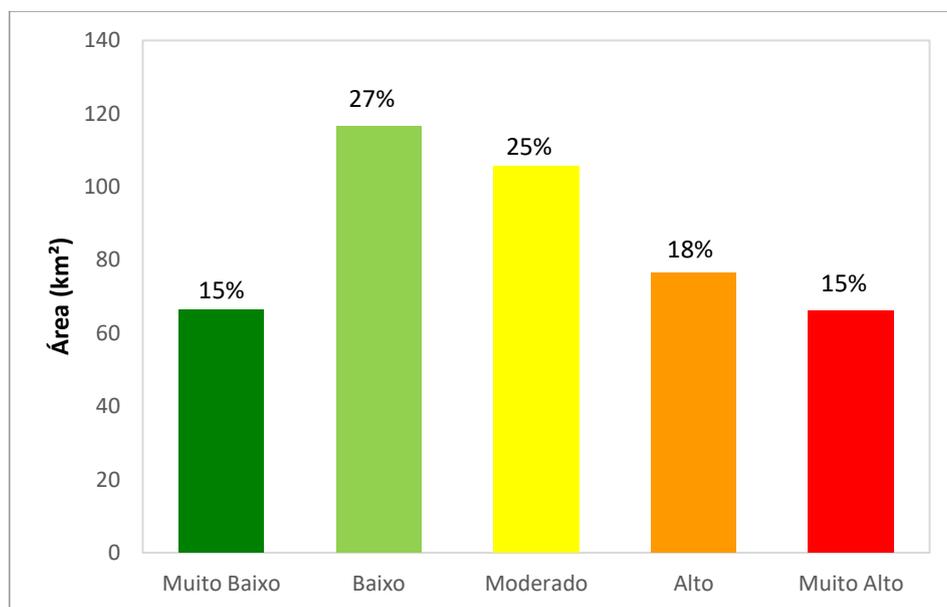


Figura 10. Quantitativo de área dos cinco níveis de vulnerabilidade do fator antrópico. O gráfico de barras representa a área percentual de cada nível.



A vulnerabilidade do fator antrópico (Figura 9) demonstra que as áreas de maior vulnerabilidade (66,07 km<sup>2</sup>) correspondente a 15% da área da bacia, também corresponderam, na maior parte, à porção oeste e sul da bacia hidrográfica como no fator hidrometeorológico. Os usos da terra encontrados nestas áreas são predominantemente agropecuária, solo exposto e dendeicultura de menor porte. O NDVI é baixo, indicando áreas de água, edificações, solo exposto, enfim, onde há pouca ou nenhuma atividade clorofiliana. Segundo Shimabukuro (1998), o NDVI é muito utilizado na estimativa de biomassa, na estimativa de cobertura vegetal e na detecção de mudanças de padrão de uso e cobertura da terra. A Distância de Estradas foi avaliado como um índice de vulnerabilidade ambiental devido ao fato de que as estradas podem destruir a estrutura do terreno original e e de que os automóveis prejudicam o ar circundante (Wei et al. 2020), além do fato da presença de estradas ser fator atrativo para o estabelecimento de assentamentos humanos. Os locais de vulnerabilidade Muito Baixa e Baixa – 15% e 27% da área, respectivamente (Figura 10) – são locais que apresentam algum tipo de vegetação (floresta primária e vegetação secundária) e uma maior distância em relação às estradas.

### 3.3.3 Vulnerabilidade do Fator Natural

A distribuição espacial da vulnerabilidade do fator antrópico composta pelos indicadores: Pedologia, Geologia e Geomorfologia, e obtida através da eq.16, é mostrada na Figura 11.

Figura 11. Distribuição espacial de vulnerabilidade para o fator natural

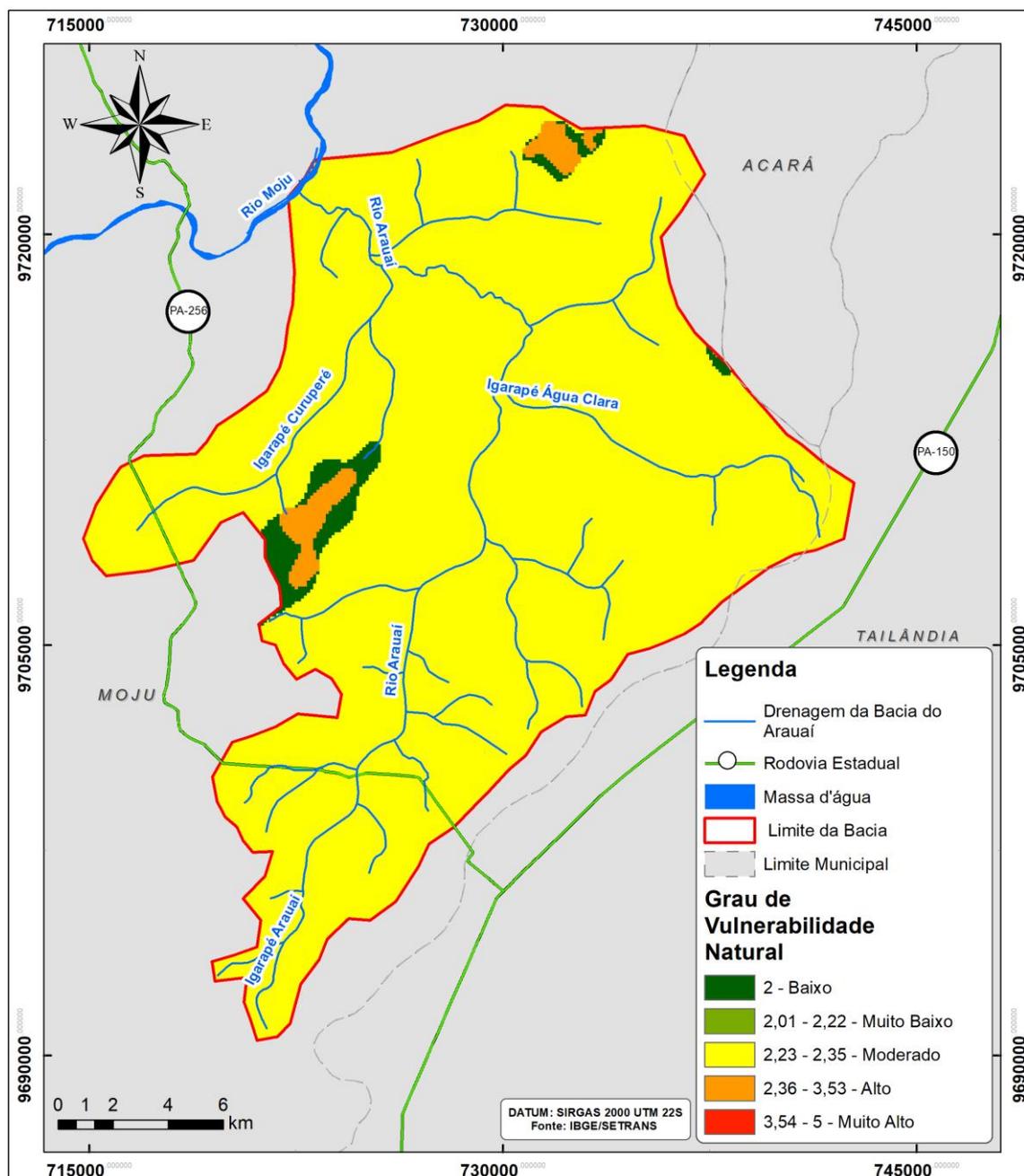
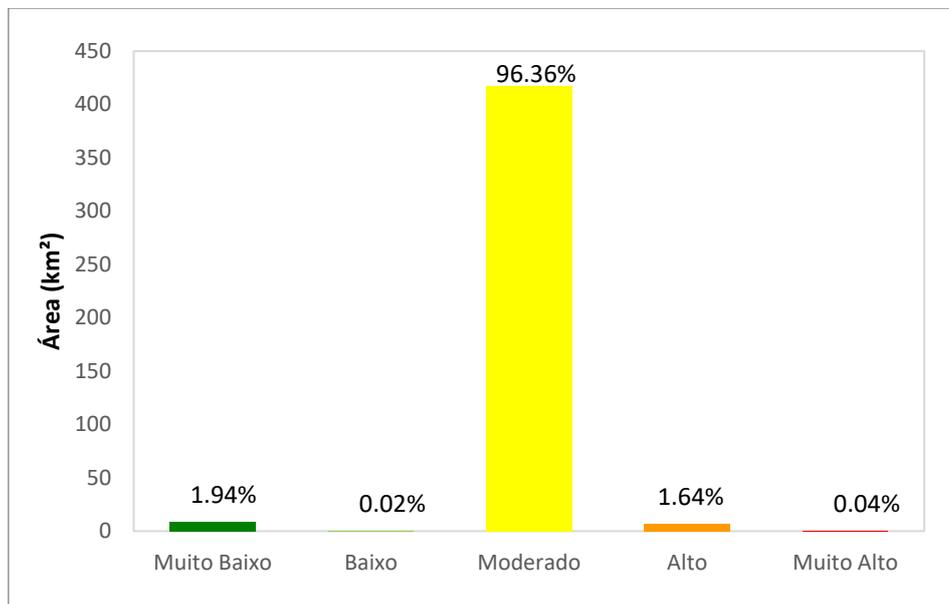


Figura 12. Quantitativo de área dos cinco níveis de vulnerabilidade do fator natural. O gráfico de barras representa a área percentual de cada nível.



O grau de vulnerabilidade Alto (1,64%) do fator natural da bacia – Figura 11 – coincidiu com áreas de Espodossolo Ferrihumilúvico Hidromórfico pois se constitui como um solo mais inundado e esta característica aumenta a possibilidade de ocorrer fenômenos naturais negativos, como os erosivos, o que os torna menos resistentes. Crepani et al. (2001) afirma que a maior ou menor suscetibilidade de um solo a sofrer os processos erosivos da morfogênese depende de diversos fatores e os mais importantes são: estrutura do solo, tipo e quantidade das argilas, permeabilidade e profundidade do solo e a presença de camadas impermeáveis.

Grande parte da extensão da bacia (96%) revelou-se com um grau de vulnerabilidade moderado para o fator natural como mostra a Figura 12, essas áreas apresentam como característica o solo ser classificado como Latossolo Amarelo Distrófico, a geologia ser de Cobertura Detrito-Laterítica Neo-Pleistocênica e a geomorfologia de Tabuleiros Paraenses.

### 3.3.4 Vulnerabilidade do Fator Topográfico

A distribuição espacial da vulnerabilidade do fator topográfico composta pelos indicadores: Elevação e Declividade, e obtida através da eq.16, é mostrada na Figura 13.

Figura 13. Distribuição espacial de vulnerabilidade para o fator topográfico

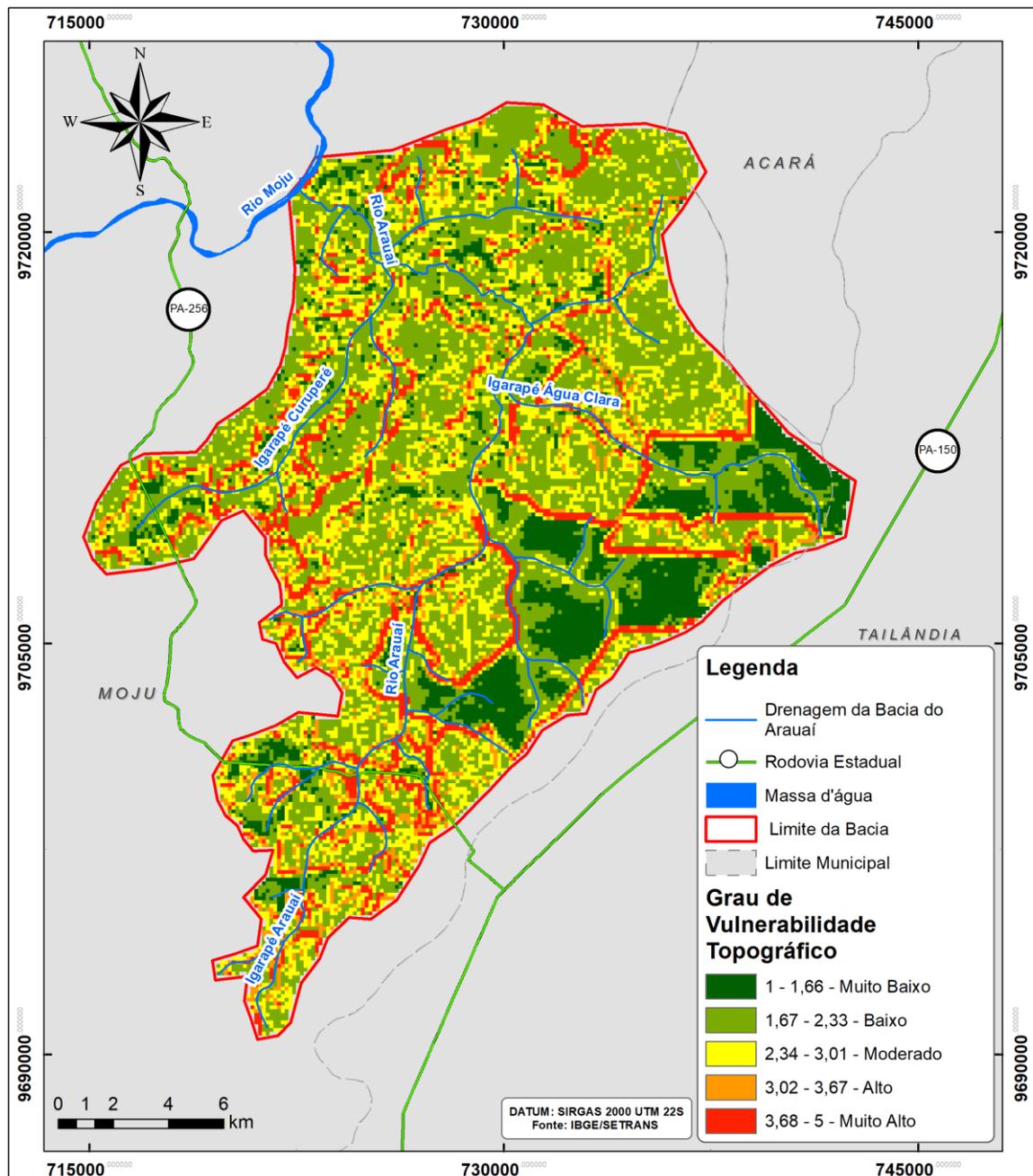
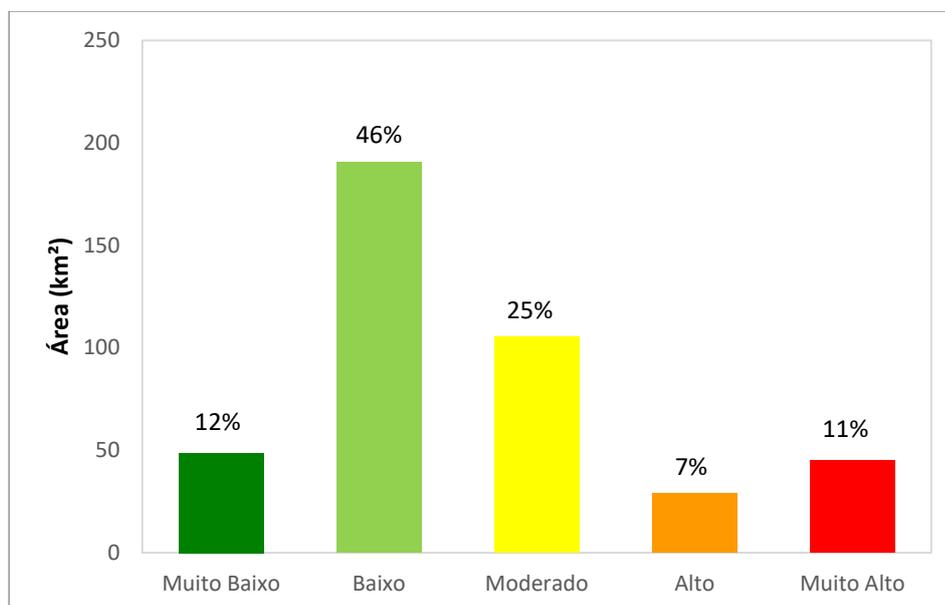


Figura 14. Quantitativo de área dos cinco níveis de vulnerabilidade do fator topográfico. O gráfico de barras representa a área percentual de cada nível.



Os graus Muito Alto (11% da área) e Alto (7% da área) de vulnerabilidade para o fator topográfico (Figura 14) se deram nas regiões onde os valores de declividade e elevação são mais altos ou o valor da elevação é mais baixo (Figura 13).

Crepani et al. (2001) afirma que a declividade e a elevação, permitem que se quantifique empiricamente a energia potencial disponível para o escoamento superficial (“run off”), isto é, a transformação de energia potencial em energia cinética responsável pelo transporte de materiais que esculpe as formas de relevo.

A declividade é a principal variável para controle de erosão do solo, inundação ou enchentes. Já a variação na elevação tem um impacto significativo na evapotranspiração, transporte, solo, clima regional e outros possíveis processos que podem impactar a vulnerabilidade ambiental (NGUYEN et al., 2016).

### 3.3.5 Vulnerabilidade Ambiental

A distribuição espacial da vulnerabilidade ambiental resultante do cálculo do método AHP dos quatro fatores conforme a eq. 17 e classificado em cinco níveis é mostrada na Figura 15.

Figura 15. Distribuição espacial da vulnerabilidade ambiental da Bacia do Rio Arauaí

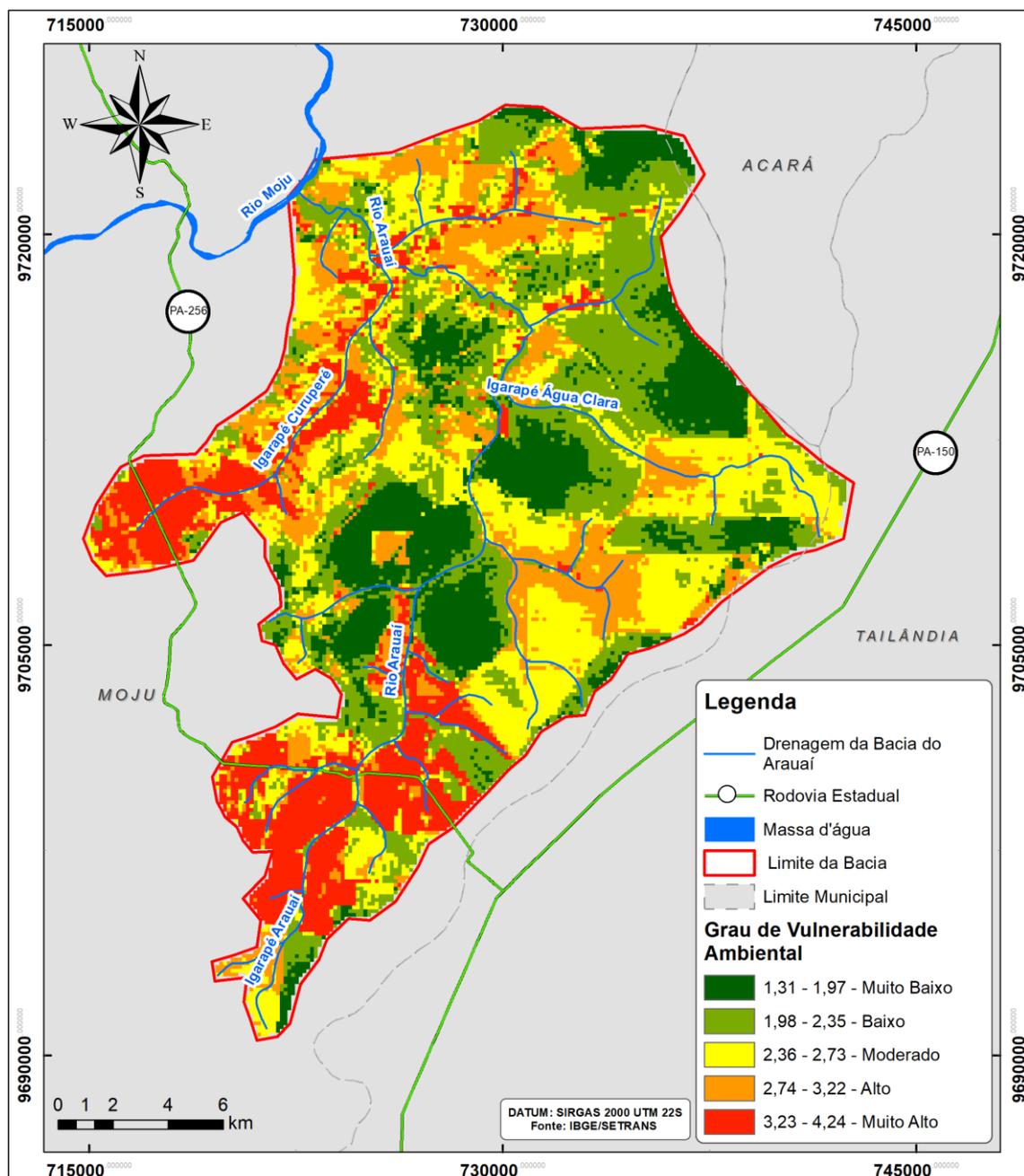
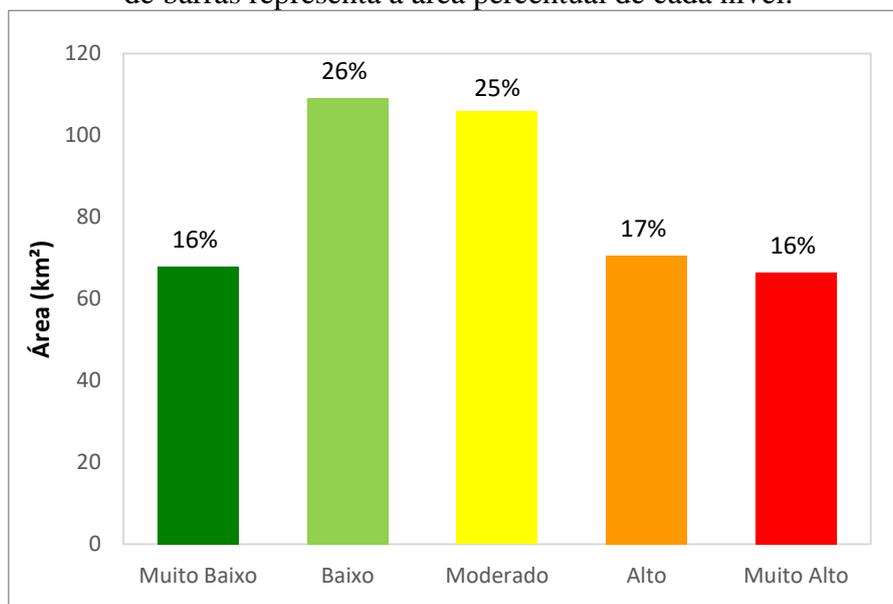


Figura 16. Quantitativo de área dos cinco níveis de vulnerabilidade ambiental. O gráfico de barras representa a área percentual de cada nível.



Os graus de Vulnerabilidade ambiental Alto e Muito Alto (17% e 16%, respectivamente) mostrados no Figura 15 e Figura 16, são encontrados principalmente em terras de agropecuária, solo exposto e plantação de dendê, que estão mais concentradas no sudoeste, oeste e leste da bacia, regiões em geral com distância pequena de corpos d'água variando de 0 a 900 metros e de estradas variando de 0 a 890 metros, TST alta entre 28 e 35°C e NDVI e NDMI baixos variando de -0,212 a 0,33 e -0,208 a 0,112, respectivamente. Suspeita-se que a causa dos altos graus de vulnerabilidade nesses espaços está no fato de que eles são afetados mais gravemente por atividades humanas devido às atividades de exploração do solo com agricultura e pecuária.

Comparando o mapa de vulnerabilidade ambiental e o de uso e cobertura da Terra, é notável que a distribuição da vulnerabilidade é uniformemente distribuída conforme os usos. Graus de vulnerabilidade Alto e Muito Alto são principalmente distribuídos em áreas onde se identifica agropecuária e solo exposto. Essas regiões são caracterizadas pela alta intensidade de atividades humanas e menor cobertura vegetal. As regiões com grau de vulnerabilidade Baixo e Muito Baixo são representadas por floresta primária e vegetação secundária, são áreas de reserva legal, em sua maioria, onde as atividades antrópicas são mais limitadas.

Os locais onde as plantações de dendê estão estabelecidas resultaram basicamente em grau de vulnerabilidade Moderado pois estão submetidos a impactos ambientais potenciais próprios de atividades de agricultura tais como: contaminação do solo e água superficiais pelo emprego de agrotóxicos e perda de solo por erosão. Apesar disto, o dendê é uma cultura arbórea e perene, o que traz um balanceamento sobre os índices avaliados nesta pesquisa pois o NDVI fica mais próximo de 1, o que indica a boa condição da vegetação, o NDMI alto indicando a presença forte de umidade e o TST mais baixo que denota a menor presença de efeitos ambientais adversos causados pelo aumento da temperatura da terra. A Tabela 10 demonstra os quantitativos de área em km<sup>2</sup> e porcentagem de área de cada um dos graus de vulnerabilidade.

Na análise espacial do mapa de vulnerabilidade ambiental da bacia, podemos perceber que as cabeceiras da bacia encontram-se em lugares com graus de vulnerabilidade mais elevados. Nestes locais podemos encontrar solos mais alterados pela ação humana, temperatura da superfície mais altas e menor umidade. Este é um ponto a ser ressaltado pois as alterações antrópicas que ameaçam as cabeceiras dos rios podem significar em alterações no regime de recargas de água dessa bacia. Diversos autores já constatararam que mudanças de uso e cobertura do solo é um fator primordial para compreender as variabilidades hídricas que ocorrem nas bacias hidrográficas (KLINK E MACHADO, 2005; KLINK, 2013; SILVA, 2020)

Tabela 10. Distribuição dos graus de vulnerabilidade ambiental, segundo a análise multicritério AHP para a Bacia do Rio Aruaí. Moju. Pará

| <b>Grau de Vulnerabilidade</b> | <b>Intervalo</b> | <b>Área (km<sup>2</sup>)</b> | <b>% Área</b> |
|--------------------------------|------------------|------------------------------|---------------|
| Muito Baixo                    | 1,31 – 1,97      | 67,89                        | 16%           |
| Baixo                          | 1,98 – 2,35      | 109,05                       | 26%           |
| Moderado                       | 2,36 – 2,73      | 105,85                       | 25%           |
| Alto                           | 2,74 – 3,22      | 70,57                        | 17%           |
| Muito Alto                     | 3,23 – 4,24      | 66,38                        | 16%           |
| <b>Total</b>                   | -                | 419,74                       | 100%          |

### 3.3.6 Zoneamento para gestão e proteção ambiental

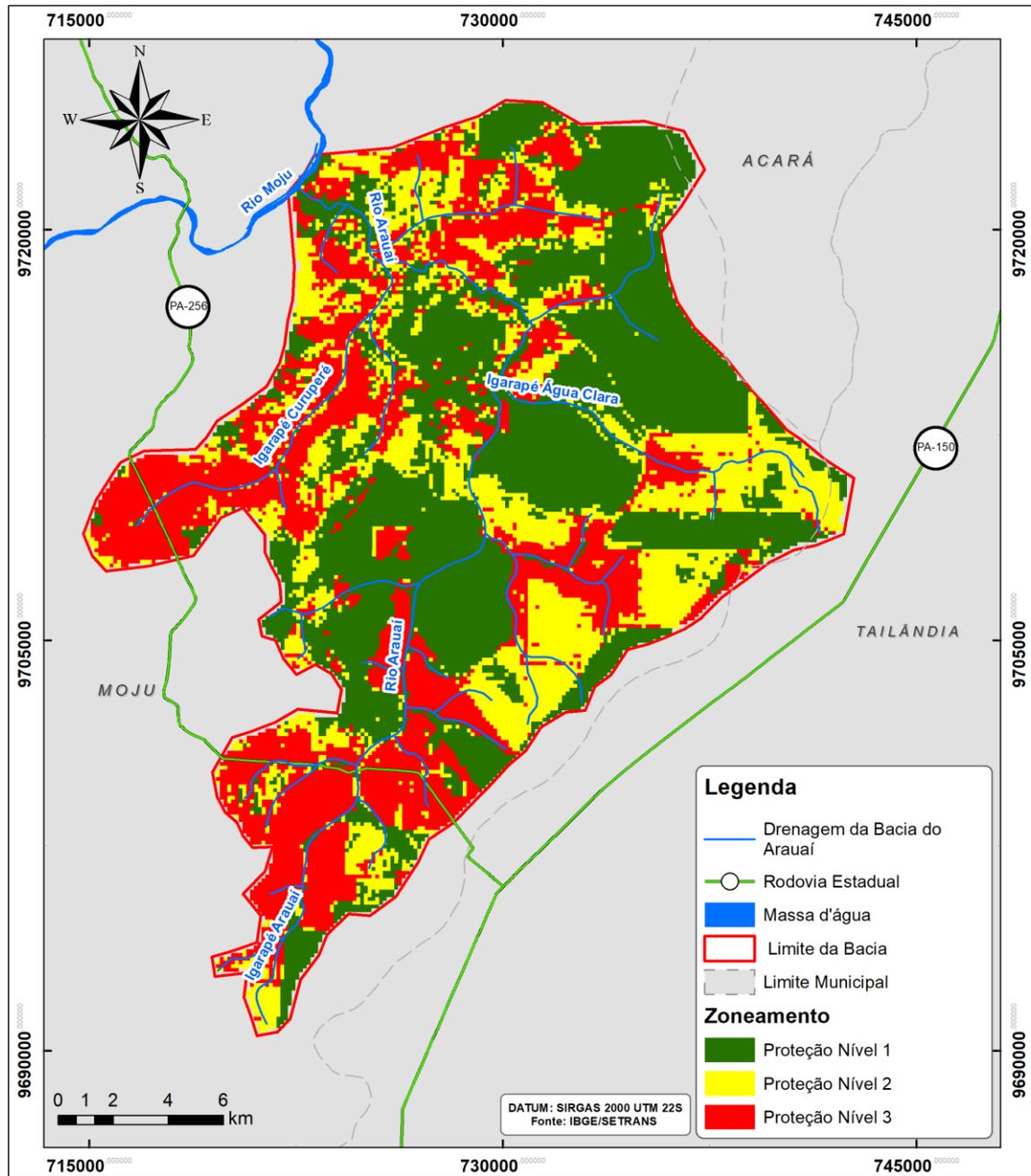
Afim de maximizar a aplicabilidade desta análise de vulnerabilidade para as autoridades locais responsáveis pela restauração do meio ambiente, derivado diretamente do mapa de vulnerabilidade ambiental, foi produzido um mapa de zoneamento de proteção ambiental (Figura 17) que se baseia na metodologia de Nguyen et al (2016). São propostas três sub-regiões, incluindo: (I) região para proteção nível 1, (II) região para proteção nível 2, e (III) região para proteção nível 3.

I. Região para proteção nível 1. Esta região é gerada pela fusão das zonas com grau de vulnerabilidade Muito Baixo e Baixo. Essas áreas são principalmente cobertas por floresta primária, com TST variando de 23 a 24°C representando 36,2% (aproximadamente 138,06 km<sup>2</sup>) da bacia. Essas áreas já possuem alguma proteção legal então naturalmente espera-se que tenha certa preocupação em mantê-las conservadas e, por isso, no mapa de zoneamento ficou classificada como região para proteção nível 1.

II. Região para proteção nível 2. Esta região é delineada pela áreas de grau de vulnerabilidade Moderado. São áreas de dendeicultura, predominantemente, ou limítrofes a áreas de Alto e Muito Alto grau de vulnerabilidade. São distribuídas por toda a bacia e representam 27,8% (aproximadamente 105,85 km<sup>2</sup>).

III. Região de proteção nível 3. Esta região é composta por locais de grau de vulnerabilidade Alto e Muito Alto, nas quais os principais tipos de uso e cobertura da terra são a agricultura, pecuária e solo exposto, marcadas por alta TST variando de 28 a 35°C respondendo por 35,9% (aproximadamente 137 km<sup>2</sup>) da bacia. Essas áreas merecem mais atenção ao se fazer o manejo dessa bacia pois são locais onde existe uma grande alteração do uso e cobertura do solo pela ação humana e que ficam mais próximos dos cursos de água e das nascentes da bacia do Arauaí. Estes locais seriam considerados prioritários para escolha de áreas para restauração, por exemplo.

Figura 17. Zoneamento da Bacia do Rio Arauaí em regiões de proteção



### 3.4 Conclusão

Esta pesquisa versa sobre a análise de vulnerabilidade ambiental de uma bacia hidrográfica da região amazônica, a Bacia do Rio Aruaí, e tem como objetivo o uso eficaz de ferramentas de geotecnologia como imagens Landsat 8 OLI, base de dados de informações ambientais oficiais georeferenciadas e Modelo Digital de Elevação para resgatar variáveis ambientais para apresentar um quadro de avaliação. Ambas as técnicas de sensoriamento remoto e SIG foram integradas com o método estatístico AHP para determinar os pesos de várias variáveis ambientais. A partir dos resultados, foi possível definir áreas de 5 diferentes graus de vulnerabilidade ambiental – Muito Baixo, Baixo, Moderado, Alto e Muito Alto.

A vulnerabilidade ambiental da Bacia do Rio Aruaí tem pouco mais da metade de sua área total variando dos graus baixo a moderado. A distribuição de padrões de grau de vulnerabilidade alta e muito alta ocorrem principalmente em áreas de levada intervenção de atividades humanas como agropecuária, solo exposto e construções, adjacentes às estradas e em algumas áreas de plantação de dendê.

A porcentagem correspondente ao grau de vulnerabilidade moderado aparece, principalmente, em áreas onde encontramos plantações de dendê e nas áreas limítrofes às de alta e muito alta vulnerabilidade. Portanto, mais estudos para entender que o status de vulnerabilidade ambiental devem ser realizados com base na dinâmica dos elementos ambientais e desenvolvimento antropogênico e medidas apropriadas devem ser adotadas para restaurar e sustentar o ambiente da bacia.

A estrutura de avaliação bem-sucedida proposta e praticada neste estudo pode ser aplicado para as outras regiões ajustando fatores relevantes para as variáveis em questão exigidas na região de interesse. Além disso, é necessário realizar avaliações de vulnerabilidade ambiental para as regiões vizinhas à Bacia do Rio Aruaí para avaliar um quadro mais amplo de vulnerabilidade na região.

## Referências

- ABDI, H.; WILLIAMS, L. J. Principal component analysis. *Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Stat.* 2 (4), 433–459. 2010.
- ALMEIDA, A. S. Mudanças de uso da terra em paisagens agrícolas com palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jacq.) e implicações para a biodiversidade arbórea na Amazônia Oriental. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Belém, 2015.
- BORDALO, C. A. L. et al. Os desafios da gestão das águas nas metrópoles da Amazônia: uma análise do modelo de gestão pública dos sistemas de abastecimento de água na região metropolitana de Belém – PA. *Revista Geonorte, Edição Especial*, v.3, n.4, p. 1181-1193, 2012.
- BHUSHAN, N.; RAI, K. *Strategic decision making: Applying the analytic hierarchy process*. London: Springer. APA 6th ed. 2004.
- CARVALHO, R. G. As Bacias Hidrográficas enquanto Unidades de Planejamento e Zoneamento Ambiental no Brasil. *Caderno Prudentino de Geografia, Presidente Prudente*, n.36, Volume Especial, p. 26-43, 2014.
- COSTA, F. H. DOS S. et al. Determinação da vulnerabilidade ambiental na bacia potiguar, região de Macau (RN), utilizando sistemas de informações geográficas. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 58, n. 2, 11.2006.
- CREPANI, E. et al. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos. 2001.
- FERREIRA, S. C. G.; LIMA, A. M. M.; CORRÊA, J. A. M. Zoneamento da bacia hidrográfica do rio Moju (Pará): usos da água e sua relação com as formas de uso e cobertura do solo *Rev. Ambient. Água* 12 (4). Ago 2017.
- FIGUEIRÊDO, M. C. B. DE et al. Análise da Vulnerabilidade Ambiental. *Documentos Embrapa*, n. 127, p. 1–46, 2010.
- GLASS, V. Expansão do dendê na Amazônia brasileira: elementos para uma análise dos impactos sobre a agricultura familiar no nordeste do Pará. *ONG Repórter Brasil*. 2013.
- GRIGIO, A. M. Aplicação de sensoriamento remoto e sistema de informação geográfica na determinação da vulnerabilidade natural e ambiental do município de Guamaré (RN): Simulação de risco às atividades da indústria petrolífera. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, p. 253, 2003.
- KÖPPEN, K. *Climatologia: com um estúdio de los climas de la tierra*. México: Fondo de Cultura Economica. 478p. 1948.
- KLINK, C. A. “Policy intervention in the cerrado savannas of brazil: changes in land use and effects on conservation”. In *Consorte –Mccrea*, A. G e Santos, E. F.

(org.) Ecology and Conservation of the Maned Wolf: Multidisciplinary Perspectives. Editora CRC Press, 2013.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. A conservação do Cerrado brasileiro. *Megadiversidade*, v. 01, n. 01, p. 147-155, 2005.

LIOU, Y. A.; NGUYEN, A. K.; LI, M. H. Assessing spatiotemporal eco-environmental vulnerability by Landsat data. *Ecological Indicators*, v. 80, n. April, p. 52–65, 2017.

MOEINADDINI, M. et al. Siting MSW landfill using weighted linear combination and analytical hierarchy process (AHP) methodology in GIS environment (case study: Karaj). *Waste Management*, v. 30, n. 5, p. 912–920, 2010.

NAHUM, J. S.; SANTOS, C. B. Impactos Socioambientais da Dendeicultura em Comunidades Tradicionais na Amazônia Paraense. *ACTA Geográfica*, Boa Vista, Ed. Esp. Geografia Agrária, p.63-80. 2013.

NEHER, C. Controverso, plantio de dendê no Brasil triplica em 4 anos. DW. 2014. Disponível em: <https://www.dw.com/pt-br/controverso-plantio-de-dend%C3%AA-no-brasil-triplica-em-4-anos/a-17429621>. Acesso em: 16/06/2021

NGUYEN, A. K. et al. Zoning eco-environmental vulnerability for environmental management and protection. *Ecological Indicators*, v. 69, p. 100–117, 2016.

NGUYEN, K. A.; LIOU, Y. A. Global mapping of eco-environmental vulnerability from human and nature disturbances. *Science of the Total Environment*, v. 664, p. 995–1004, 2019.

RAFFO, J. G. DA G. O Processo Analítico Hierárquico E Seu Uso Na Modelagem Do Espaço Geográfico. Geography Department, University of Sao Paulo, p. 26–37, 2012.

SAHOO, S.; DHAR, A.; KAR, A. Environmental vulnerability assessment using Grey Analytic Hierarchy Process based model. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 56, p. 145–154, 2016.

SAATY, T.L. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York. 1980.

SAATY, T. L. *Método de Análise Hierárquica*, Tradução de Wainer da Silveira e Silva, McGraw-Hill, Makron, São Paulo, SP. 1991.

SILVA, E. V. da; RODRIGUEZ, J. M. M.; LEAL, A. C. Planejamento Ambiental em Bacias Hidrográficas. In: SILVA, E. V. da; RODRIGUEZ, J. M. M.; MEIRELES, A. J. de A. Planejamento ambiental e bacias hidrográficas. Tomo 1. Fortaleza: Edições UFC, 2011.

SILVA, P. R. F. A expansão agrícola no cerrado e seus impactos no ciclo hidrológico: estudo de caso na região do MATOPIBA. Dissertação de Mestrado em Desenvolvimento Sustentável. Universidade de Brasília (Brasil). Brasília, 2020.

SMITH, M.; GOODCHILD, M. F.; LONGLEY, P. A. Geospatial Analysis, 5th Edition. The Winchelsea Press, Winchelsea, UK. 2015.

SOUZA, J. O. P. Dos Sistemas Ambientais ao Sistema Fluvial – Uma Revisão de Conceitos. Caminhos de Geografia. 2013.

YANG, G.; CHEN, Z. RS-based fuzzy multiattribute assessment of eco-environmental vulnerability in the source area of the Lishui River of northwest Hunan Province, China. *Natural Hazards*, v. 78, n. 2, p. 1145–1161, 2015.

WEI, W. et al. Regional-scale assessment of environmental vulnerability in an arid inland basin. *Ecological Indicators*, v. 109, n. September 2019, 2020.

ZHAO, J. et al. Environmental vulnerability assessment for mainland China based on entropy method. *Ecological Indicators*, v. 91, n. April, p. 410–422, 2018.

ZOU, T.; YOSHINO, K. Environmental vulnerability evaluation using a spatial principal components approach in the Daxing'anling region, China. *Ecological Indicators*, v. 78, p. 405–415, 2017.

## CAPÍTULO 4 – CONCLUSÃO GERAL

### 4.1 Conclusões de forma integrada

Esta pesquisa teve como objeto a Bacia Hidrográfica do Rio Arauaí, uma bacia da região amazônica que já sofreu um intenso processo de antropização, tendo sua paisagem bastante modificada principalmente depois da chegada da dendeicultura no local. Na análise multitemporal da mudança de uso e cobertura da terra, a qual teve como marco o Programa de Produção Sustentável de Óleo de Palma (PPSOP) implantado no Brasil pelo Governo Federal, pôde-se observar que não teve grande diferença a quantidade de área convertidas em dendê quando comparados os períodos pré e pós-PPSOP porém a modificação ficou por conta da quantidade de área convertidas de floresta primária para dendê tendo esta diminuído no período pós-PPSOP, tornando-se a agropecuária como principal classe de conversão para a cultura do dendê. A partir disso podemos notar a influência da política pública como um fator que pode modificar o padrão de alteração do espaço geográfico.

É importante frisar que a dendeicultura desenvolvida na bacia não conseguiu cumprir os objetivos de desmatamento zero propostos pelo PPSOP pois 1237,08 hectares de dendê em 2020 passaram por conversão intermediária, ou seja, eram floresta primária em 1999 e em 2010 foram convertidas em outro tipo de uso para que finalmente em 2020 fossem convertidas em dendê. Depreende-se disso que dependendo do período em que começa a análise temos pouco dendê realmente livre de desmatamento na Amazônia.

Além disso, as áreas remanescentes de floresta primária encontradas em 2020 são constituídas quase que totalmente de áreas de Reserva Legal e Área de Proteção Permanente, o que significa que restaram poucas áreas de floresta primária a serem legalmente convertidas em outros usos. Esse fato nos leva a questionar se a real motivação para a redução da conversão de floresta primária foi impulsionada pela implementação da PPSOP ou se a razão para isto foi o esgotamento da conversão legal de áreas fora da RL de propriedades rurais e APP.

Na análise de vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica foi possível definir áreas de 5 diferentes graus de vulnerabilidade ambiental – Muito Baixo, Baixo, Moderado, Alto e Muito Alto. Pôde-se concluir que a vulnerabilidade ambiental da

Bacia do Rio Arauaí tem pouco mais da metade de sua área total variando dos graus baixo a moderado e a distribuição de padrões de grau de vulnerabilidade alta e muito alta ocorrem principalmente em áreas de levada intervenção de atividades humanas como agropecuária, solo exposto e construções, adjacentes às estradas e em algumas áreas de plantação de dendê. A porcentagem correspondente ao grau de vulnerabilidade moderado aparece, principalmente, em áreas onde encontramos plantações de dendê e nas áreas limítrofes às de alta e muito alta vulnerabilidade.

#### **4.2 Recomendações**

Portanto, mais estudos para entender o status de vulnerabilidade ambiental devem ser realizados com base na dinâmica dos elementos ambientais e desenvolvimento antropogênico e medidas apropriadas devem ser adotadas para restaurar e sustentar o ambiente da bacia. A estrutura de avaliação bem-sucedida proposta e praticada neste estudo pode ser aplicado para as outras regiões ajustando fatores relevantes para as variáveis em questão exigidas na região de interesse. Além disso, é necessário realizar avaliações de vulnerabilidade ambiental para as regiões vizinhas à Bacia do Rio Arauaí para avaliar um quadro mais amplo de vulnerabilidade na região.

## Referências

- AB'SABER, A. N. Potencialidades paisagísticas brasileiras. *Boletim Geomorfologia*, São Paulo, Inst. de Geografia da USP, n. 55, 1977.
- ABDI, H.; WILLIAMS, L. J. Principal component analysis. *Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Stat.* 2 (4), 433–459. 2010.
- ADAMI, M. Seasonality of vegetation types of South America depicted by moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) time series. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation.* 69. 148–163. 2018.
- AGUIAR, A. P. D. Modelagem de mudanças de uso e cobertura do solo na Amazônia: Questões Gerais. 2003.
- ALCANTARA, C. A. et al. Geospatial Assessment and Modeling Of Urban Heat Islands In Quezon City, Philippines Using Ols And Geographically Weighted Regression. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, v. 42, n. 4/W16, p. 85–92, 2019.
- ALLOU, G.; BONIN, B. The Landsat 7 etm+ remote sensing imagery for lithological and structural mapping in Cote D Ivoire (West Africa) : Case of Dabakal area. 11(36), pp. 141–163. 2015.
- ALMEIDA, A. S. Mudanças de uso da terra em paisagens agrícolas com palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jacq.) e implicações para a biodiversidade arbórea na Amazônia Oriental. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Belém, 2015.
- ANDRADE M. M. N. de et al. A socioeconomic and natural vulnerability index for oil spills in an Amazonian harbor: A case study using GIS and remote sensing. *Journal of Environmental Management.* 2010.
- ANDRADE, M. M. N.; SZLAFSZTEIN, C.F. Vulnerability assessment including tangible and intangible components in the index composition: An Amazon case study of flooding and flash flooding. *Science of the Total Environment.* 903–912. 2018.
- ARONOFF, S. *Geographic information systems: a management perspective.* Ottawa: DL Publications, 1989. 249p.
- ASPIAZÚ, C.; ALVES, L. M.; VALENTE, O. F. Modelos Digitais de Terrenos Conceituação e Importância. *Boletim de Pesquisa Florestal*, Colombo, n. 21, p.27-36, dez. 1990.
- BEASLEY, C. W.; BARNHART, W. D. Introduction to this special section: Remote sensing. *The Leading Edge.* 2017.
- BERTRAND, G. *Paisagem e Geografia Física Global. Esboço Metodológico.* Tradução: Olga Cruz. *Revista Raega*, n. 8. Curitiba:2004.

BHUSHAN, N.; RAI, K. Strategic decision making: Applying the analytic hierarchy process. London: Springer. APA 6th ed. 2004.

BORATTO, I. M. D. P.; GOMIDE, R. L. Aplicação dos índices de vegetação NDVI, SAVI e IAF na caracterização da cobertura vegetativa da região Norte de Minas Gerais. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, p. 7345–7352, 2013.

BORDALO, C. A. L. et al. Os desafios da gestão das águas nas metrópoles da amazônia: uma análise do modelo de gestão pública dos sistemas de abastecimento de água na região metropolitana de belém – pa. Revista Geonorte, v. 3, n. 4, p. 1181–1193, 2012.

BRAGA, T. G. M. et al. The dynamics of environmental alterations based on transitions, permanences and vulnerabilities: The case of the moju/pa/amazon river Basin. Interciencia, v. 44, n. 3, p. 178–186, 2019.

BRASIL. LEI Nº 9.433, DE 8 DE JANEIRO DE 1997 Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm) . Acesso em: 18 jul. 2020.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Palma de Óleo - Programa de Produção Sustentável. 2016. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/cartas-de-servico/politica-de-agroenergia/palma-de-oleo-programa-de-producao-sustentavel>. Acesso em: 24/08/2021.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB). 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/agricultura-familiar/biodiesel/programa-nacional-de-producao-e-uso-do-biodiesel-pnpb>. Acesso em: 24/08/2021.

CACHOEIRA, J. N. et al. Dinâmica espacial da paisagem do Parque Estadual do Jalapão (TO) de 2000 a 2015. Ci. Fl., Santa Maria, v. 30, n. 3, p. 755-766, jul./set. 2020.

CARVALHO, R. G. Sistemas ambientais e desmatamento na região da Bacia Hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró/RN. Revista da ANPEGE, v. 8, n. 9, p. 107-118, jan./jul. 2012.

COELHO, M. C. N. Impactos Ambientais em Áreas Urbanas. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. Impactos Ambientais Urbanos no Brasil. 6 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010.

CONAMA. Resolução CONAMA nº 1, de 23 de janeiro de 1986. Publicada no DOU, de 17 de fevereiro de 1986, Seção I. Licenciamento Ambiental - Normas e Procedimentos, p. 636–639, 2010.

CONTI, J. B. Geografia e Paisagem. Ciência e Natura, Santa Maria, v. 36 Ed. Especial, 2014, p. 239–245. Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas – UFSM. 2014.

COSTA, F. H. S. et al. Determinação da vulnerabilidade ambiental na bacia potiguar, região de Macau (RN), utilizando sistemas de informações geográficas. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 58, n. 2, 11.2006.

COSTA, F. R. Análise da Vulnerabilidade Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Doce (Rn) Natal – RN. p. 244, 2018.

DHAKAL, A. S.; AMADA, T.; ANIYA, M. Landslide Hazard Mapping and Its Evaluation Using GIS: An Investigation of Sampling Schemes for a Grid-Cell Based Quantitative Method, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 66, No. 8, 2000, pp. 981-989.2000.

ETTO, T. L. et al. Ecologia da paisagem de remanescentes florestais na Bacia Hidrográfica do Ribeirão das Pedras - Campinas-SP. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v.37, n.6, p.1063-1071, 2013.

FEARNSIDE, P. M. Brazil's Cuiaba-Santarem (BR-163) Highway: The environmental cost of paving a soybean corridor through the Amazon, *Environ. Manage.*, 39,501414. 2007.

FELGUEIRAS, C. A. Modelagem numérica de terreno. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C. e MONTEIRO, A. M. V. *Introdução à Ciência da Geoinformação*. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). 2001.

FIGUEIRÊDO, M. C. B. DE et al. Análise da Vulnerabilidade Ambiental. Documentos Embrapa, n. 127, p. 1–46, 2010.

FORMAN, R. T. T.; GODRON, M. *Landscape ecology*. New York: John Wiley & Sons, 1986.

FORMAN, R. T. T. et al. *Road Ecology: Science and Solutions*, Island Press, Washington, D. C. 2003.

GAO, B. C. Naval Research Laboratory, 4555 Overlook Ave. *Remote Sens. Environ*, v. 7212, n. April, p. 257–266, 1996.

GRIGIO, A. M. Aplicação de sensoriamento remoto e sistema de informação geográfica na determinação da vulnerabilidade natural e ambiental do município de Guamaré (RN): Simulação de risco às atividades da indústria petrolífera. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, p. 253, 2003.

GUHA, S. et al. Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy. *European Journal of Remote Sensing*, v. 51, n. 1, p. 667–678, 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. Geologia e Geomorfologia. Disponível: <http://www.dsr.inpe.br/DSR/areas-de-atuacao/topicos-de-pesquisa/geologia-geomorfologia#:~:text=A%20Geomorfologia%20estuda%20a%20origem,por%20fatores%20end%C3%B3genos%20e%20ex%C3%B3genos>. Acesso em: 16/01/2022

JIA, K. et al. Land cover classification using Landsat 8 Operational Land Imager data in Beijing, China. *Geocarto International*, v. 29, n. 8, p. 941-951, 2014.

JOHNSON, B. A. Scale Issues Related to the Accuracy Assessment of Land Use/Land Cover Maps Produced Using Multi-Resolution Data: Comments on “The Improvement of Land Cover Classification by Thermal Remote Sensing. *Remote Sensing*, v. 7, n. 7, p. 13436-13439, 2015.

JORDAO, C. D. O. Análise da vulnerabilidade ambiental no planejamento espacial do cultivo de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Engenharia Ambiental) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011., p. 118, 2011.

LAGE, C.; PEIXOTO, H.; BATISTA VIEIRA, C. M. Aspectos da vulnerabilidade ambiental na Bacia do Rio Corrente-BA. *GeoTextos*, v. 4, p. 11–36, 2009.

LATRUBESSE, E. M. et al. Damming the rivers of the Amazon basin. *Nature*, v. 546, n. 7658, p. 363–369, 2017.

LIU, Y. A.; NGUYEN, A. K.; LI, M. H. Assessing spatiotemporal eco-environmental vulnerability by Landsat data. *Ecological Indicators*, v. 80, n. April, p. 52–65, 2017.

LOPES, V. M.; RIBEIRO, S.C. Etnogeomorfologia e paisagem. *REGNE*, Vol.2, Nº Especial. 2016.

MANDELBROT, B. B. *The Fractal Geometry of Nature*. W. H. Freeman and Co., New York. 1982.

MANDELBROT, B. B. *Fractals, Form, Chance and Dimension*. W. H. Freeman and Co., New York. 1977.

MASEK, J. G. et al. Landsat-7 ETM+ as an observatory for land cover Initial radiometric and geometric comparisons with Landsat-5 Thematic Mapper. *Remote Sensing of Environment*, v. 78, p. 118-130, 2001.

MCFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, v. 17, n. 7, p. 1425–1432, 1996.

MCGARIGAL, K. *Fragstats Help*. 2015

MENESES, P. R. et al. *Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto*. n. April 2019, 1998.

MEER, F. D. et al. Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 14 112–128. 2012.

MENDES, M. F.; SANTOS, A. C. P.; GUEDES, L. S. Dinâmica da paisagem na microrregião geográfica de Araguaína/TO: subsídios para o planejamento e conservação ambiental. *Revista de Geografia (Recife)* V. 38, No. 2, 2021

MOEINADDINI, M. et al. Siting MSW landfill using weighted linear combination and analytical hierarchy process (AHP) methodology in GIS environment (case study: Karaj). *Waste Management*, v. 30, n. 5, p. 912–920, 2010.

MORAES, I. S. et al. Monitoramento da abertura no dossel a partir de fotografias hemisféricas com NDVI e MLME em área de concessão florestal: Mamuru-Arapiuns/PA. *Revista Brasileira de Cartografia*, No 68/7: 1303-1315. 2016.

MUCHAILH, M. C. et al. Metodologia de planejamento de paisagens fragmentadas visando a formação de corredores ecológicos. *Floresta*, Curitiba, v. 40, n. 1, p. 147-162, 2010.

NGUYEN, A. K. et al. Zoning eco-environmental vulnerability for environmental management and protection. *Ecological Indicators*, v. 69, p. 100–117, 2016.

NGUYEN, K. A.; LIOU, Y. A. Global mapping of eco-environmental vulnerability from human and nature disturbances. *Science of the Total Environment*, v. 664, p. 995–1004, 2019.

OLIVEIRA, P. C. A. DE. Cenários Ambientais e Diagnose da Bacia Hidrográfica do Cenários ambientais e diagnose da Bacia Hidrográfica do Córrego Guaribas , Uberlândia-MG . 2009.

RAMALHO FILHO, A.; BEEK, K.J. Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1995.

RAFFO, J. G. DA G. O Processo Analítico Hierárquico E Seu Uso Na Modelagem Do Espaço Geográfico. *Geography Department, University of Sao Paulo*, p. 26–37, 2012.

RIBEIRO, F. L. et al. Uso da terra do Alto rio pardo, obtido a partir da análise visual IN: Anais... I Ciclo de Atualização Florestal do Conesul Santa Maria: UFSM,. v. único, p. 75 – 81, 1999.

RIBEIRO, S.; MARQUES, J. C. B. Características da paisagem e sua relação concorrência de bugios-ruivos (*Alouatta guariba clamitans* Cabrera, 1940; Primates Atelidae) em fragmentos florestais no vale do Taquari, RS. *Natureza e Conservação*, v.3, n.2, p.65-78, 2005.

RODRIGUEZ, J. M. M, SILVA, E. V. da, CAVALCANTI, A. P. B. *Geocologia das Paisagens: uma visão geossistêmica da análise ambiental*. Fortaleza: Editora UFC, 2017.

ROMERO, A. F. et al. Integrated assessment for establishing an oil environmental vulnerability map: Case study for the Santos Basin region, Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, v. 74, n. 1, p. 156–164, 2013.

ROSS, J. L. S. Geomorfologia: ambiente e planejamento. São Paulo: Contexto. p.85. 1990.

\_\_\_\_\_, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. Revista do Departamento de Geografia. FFLCH-USP, São Paulo, n.8, p.63-74. 1994.

SAHOO, S.; DHAR, A.; KAR, A. Environmental vulnerability assessment using Grey Analytic Hierarchy Process based model. Environmental Impact Assessment Review, v. 56, p. 145–154, 2016.

SALGUEIRO, T. B. Paisagem e Geografia. Finisterra, XXXVI, 72, pp. 37-53. 2001.

SANDEVILLE JR, E. Paisagem. Paisagem Ambiente: ensaios - n. 20 - São Paulo - p. 47 - 60 – 2005

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO - SBCS. Pedologia - Fundamentos. Disponível em: [https://www.sbc.org.br/loja/index.php?route=product/product&product\\_id=57#:~:text=A%20Pedologia%2C%20como%20ramo%20da,e%20o%20mapeamento%20dos%20solos.&text=A%20Pedologia%20%C3%A9%20uma%20%C3%A1rea,paisagem%2C%20com%20suas%20implica%C3%A7%C3%B5es%20socioambientais](https://www.sbc.org.br/loja/index.php?route=product/product&product_id=57#:~:text=A%20Pedologia%2C%20como%20ramo%20da,e%20o%20mapeamento%20dos%20solos.&text=A%20Pedologia%20%C3%A9%20uma%20%C3%A1rea,paisagem%2C%20com%20suas%20implica%C3%A7%C3%B5es%20socioambientais). Acesso em: 16/01/2022.

SERRÃO, S. L. C.; BELATO, L. D. S.; DIAS, R. P. A vulnerabilidade natural e ambiental do município de Belém (PA). Nature and Conservation, v. 12, n. 1, p. 36–45, 2019.

SILVA, D. C. C. et al. Identificação de Áreas com Perda de Solo Acima do Tolerável Usando NDVI para o Cálculo do Fator C da USLE. R. Ra'e Ga. Curitiba, v.42, p. 72 - 85, Dez. 2017.

SHAO, H. et al. A method to the impact assessment of the returning grazing land to grassland project on regional eco-environmental vulnerability. Environmental Impact Assessment Review, v. 56, n. 2016, p. 155–167, 2016.

SHIMABUKURO, Y. E. Índice de Vegetação e Modelo Linear de Mistura Espectral no Monitoramento da região do Pantanal. Pesquisa Agropecuária Brasileira. (33): 1729-1737, 1998.

SCHNEIDER, A. Monitoring land cover change in urban and peri-urban areas using dense time stacks of Landsat satellite data and a data mining approach. Remote Sensing of Environment, v. 124, p. 689-704, 2012.

SOBRINO, J. A.; IRAKULIS, I. A methodology for comparing the surface urban heat Island in selected urban agglomerations around the world from Sentinel-3 SLSTR data. Remote Sensing, v. 12, n. 12, 2020.

SOUZA-FILHO, P. W. M. et al. Changes in the land cover and land use of the Itacaiúnas river watershed, arc of deforestation, Carajás, Southeastern Amazon. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. XL-7/W3, p. 1491-2015, 2015.

SZEWRĄŃSKI, S. et al. Socio-Environmental Vulnerability Mapping for Environmental and Flood Resilience Assessment: The Case of Ageing and Poverty in the City of Wrocław, Poland. *Integrated Environmental Assessment and Management*, v. 14, n. 5, p. 592–597, 2018.

TAGLIANI, C. Técnica para avaliação da vulnerabilidade ambiental de ambientes costeiros utilizando um sistema geográfico de informações. *Anais XI SBSR*, v. 0, p. 1657–1664, 2003.

TRICART, J. Ecodinâmica, 1977. Disponível em: <<http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/monografias/GEBIS - RJ/ecodinamica.pdf>>

TRIPATHI, M. K. et al. Landslide Hazard Zonation Mapping of Chamoli Landslides in Remote Sensing and Gis Environment. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLII-5, 2018, 20–23. 2018.

TROMBULAK, S. C.; FRISSELL, C. A., Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic ecosystems, *Conserv. Biol.*, 14, 18-30. 2000.

TROPMAIR, H. GALINA, M. H. Geossistemas. *Revista de Geografia da UFC*, ano 05, número 10, 2006.

USGS. Landsat 8 Data Users Handbook. Nasa, v. 8, n. June, p. 97, 2016.

USGS. Landsat 7 (L7) Data Users Handbook. v. 7, n. November, p. 106, 2019.

VIANA, V. M. Biologia e manejo de fragmentos florestais atuais. In: CONGRESSO BRASILEIRO FLORESTAL, 6., 1990, Campos do Jordão. *Anais... Campos do Jordão: SBS/SBEF*, 1990. p.113-118.

VIEIRA, I.C.G. et al. Deforestation and threats to the biodiversity of Amazonia. *Brazilian Journal of Biology*. Dec. 2008.

VILLA, F.; MCLEOD, H. Environmental vulnerability indicators for environmental planning and decision-making: Guidelines and applications. *Environmental Management*, v. 29, n. 3, p. 335–348, 2002.

WEI, W. et al. Regional-scale assessment of environmental vulnerability in an arid inland basin. *Ecological Indicators*, v. 109, n. September 2019, 2020.

YANG, G.; CHEN, Z. RS-based fuzzy multiattribute assessment of eco-environmental vulnerability in the source area of the Lishui River of northwest Hunan Province, China. *Natural Hazards*, v. 78, n. 2, p. 1145–1161, 2015.

ZHA, Y.; GAO, J.; NI, S. “Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery”. In: *International Journal of Remote Sensing*. vol. 24, nº 3, p. 583 -594. 2003.

ZHAO, J. et al. Environmental vulnerability assessment for mainland China based on entropy method. *Ecological Indicators*, v. 91, n. April, p. 410–422, 2018.

ZOU, T.; YOSHINO, K. Environmental vulnerability evaluation using a spatial principal components approach in the Daxing'anling region, China. *Ecological Indicators*, v. 78, p. 405–415, 2017.

## Apêndice

Tabela 11. Matriz de comparação de pares, pesos das classes, e Índice de Consistência (CR).

| <i>Hidrometeorológico - B<sub>1</sub></i>         |      |      |                |                |                |
|---|------|------|----------------|----------------|----------------|
|   | (1)  | (2)  | (3)            | Peso ( $w_i$ ) |                |
| (1) NDMI – C <sub>1</sub>                         | 1    | 0.33 | 0.2            | 0.109          |                |
| (2) TST – C <sub>2</sub>                          | 3    | 1    | 0.5            | 0.309          |                |
| (3) Distância de Corpos Hídricos – C <sub>3</sub> | 5    | 2    | 1              | 0.582          |                |
| CR=0,004  |      |      |                |                |                |
| <i>Antrópico - B<sub>2</sub></i>                  |      |      |                |                |                |
|   | (1)  | (2)  | (3)            | Peso ( $w_i$ ) |                |
| (1) Distância de Estradas – C <sub>4</sub>        | 1    | 0.33 | 2              | 0.230          |                |
| (2) Cobertura e Uso da Terra – C <sub>5</sub>     | 3    | 1    | 5              | 0.648          |                |
| (3) NDVI – C <sub>6</sub>                         | 0.5  | 0.2  | 1              | 0.122          |                |
| CR=0,004  |      |      |                |                |                |
| <i>Natural - B<sub>3</sub></i>                    |      |      |                |                |                |
|   | (1)  | (2)  | (3)            | Peso ( $w_i$ ) |                |
| (1) Pedologia – C <sub>7</sub>                    | 1    | 3    | 5              | 0,648          |                |
| (2) Geologia – C <sub>8</sub>                     | 0,33 | 1    | 2              | 0,230          |                |
| (3) Geomorfologia – C <sub>9</sub>                | 0,2  | 0,5  | 1              | 0,122          |                |
| CR=0,004  |      |      |                |                |                |
| <i>Topográfico - B<sub>4</sub></i>                |      |      |                |                |                |
|   | (1)  | (2)  | Peso ( $w_i$ ) |                |                |
| (1) Elevação – C <sub>10</sub>                    | 1    | 2    | 0,333          |                |                |
| (2) Declividade – C <sub>11</sub>                 | 0,5  | 1    | 0,667          |                |                |
| CR=0,00   |      |      |                |                |                |
| <i>Vulnerabilidade Ambiental - VA</i>             |      |      |                |                |                |
|   | (1)  | (2)  | (3)            | (4)            | Peso ( $W_i$ ) |
| (1) Hidrometeorológico – B <sub>1</sub>           | 1    | 0,33 | 1              | 2              | 0,190          |
| (2) Antrópico – B <sub>2</sub>                    | 3    | 1    | 2              | 5              | 0,489          |
| (3) Natural – B <sub>3</sub>                      | 1    | 0,5  | 1              | 3              | 0,232          |
| (4) Topográfico – B <sub>4</sub>                  | 0,5  | 0,2  | 0,33           | 1              | 0,089          |
| CR=0,009  |      |      |                |                |                |

Tabela 12. Padronização dos indicadores dos fatores de relevância para a vulnerabilidade ambiental, classificados de 1 a 5, sendo 1, característica menos vulnerável e 5, característica mais vulnerável.

### ANTRÓPICOS

| <i>NDVI</i>    |        | <i>Distância de Estradas</i> |        |
|----------------|--------|------------------------------|--------|
| Intervalo      | Classe | Intervalo (metros)           | Classe |
| -0,212 – 0,233 | 5      | 0 – 896,2                    | 5      |
| 0,234 – 0,333  | 4      | 896,3 – 1917                 | 4      |
| 0,334 – 0,414  | 3      | 1918 – 3037                  | 3      |
| 0,415 – 0,473  | 2      | 3038 – 4257                  | 2      |
| 0,474 – 0,582  | 1      | 4258 – 6348                  | 1      |

| <i>Cobertura e Uso da Terra</i> |        |
|---------------------------------|--------|
|                                 | Classe |
| Floresta Primária               | 1      |
| Vegetação Secundária            | 2      |
| Campinarana                     | 2      |
| Dendeicultura                   | 3      |
| Agropecuária                    | 4      |
| Solo Exposto                    | 5      |

**HIDROMETEREOLÓGICOS**

| <i>TST</i>  |        |
|-------------|--------|
| Intervalo   | Classe |
| 23,3 – 24,7 | 1      |
| 24,8 – 26,1 | 2      |
| 26,2 – 28,1 | 3      |
| 28,2 – 30,3 | 4      |
| 30,4 – 35,2 | 5      |

| <i>Distância dos Corpos Hídricos</i> |        |
|--------------------------------------|--------|
| Intervalo                            | Classe |
| 0 – 269,5                            | 5      |
| 269,6 – 565,9                        | 4      |
| 566 – 902,7                          | 3      |
| 902,8 – 1361                         | 2      |
| 1362 – 3436                          | 1      |

| <i>NDMI</i>      |        |
|------------------|--------|
| Intervalo        | Classe |
| -0,208 – 0,00123 | 5      |
| 0,00124 – 0,112  | 4      |
| 0,113 – 0,213    | 3      |
| 0,214 – 0,281    | 2      |
| 0,282 – 0,391    | 1      |

**NATURAIS**

| <i>Geologia</i>                                |        |
|--|--------|
|  | Classe |
| Cobertura Sedimentar do Baixo Tocantins        | 2      |
| Cobertura Detrito-Laterítica Neo-Pleistocênica | 3      |
| Corpo d'água Continental                       | 5      |

| <i>Pedologia</i>                         |        |
|--|--------|
|  | Classe |
| Latossolo Amarelo Distrófico             | 2      |
| Espodossolo Ferrihumilúvico Hidromórfico | 4      |
| Corpos d'água Continental                | 5      |

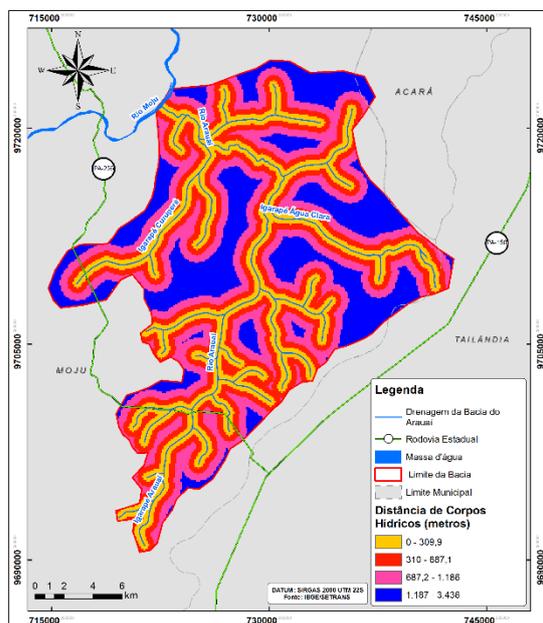
| <i>Geomorfologia</i>          |        |
|-------------------------------|--------|
|                               | Classe |
| Tabuleiros Paraenses          | 2      |
| Planícies e Terraços Fluviais | 3      |
| Corpo d'água Continental      | 5      |

## TOPOGRÁFICOS

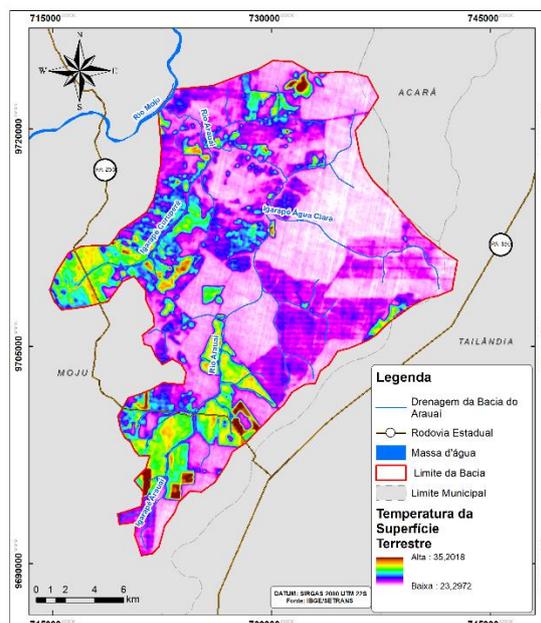
| <i>Declividade</i> |        |
|--------------------|--------|
| Intervalo          | Classe |
| 0,007 – 1,32       | 1      |
| 1,33 – 2,63        | 2      |
| 2,64 – 4,22        | 3      |
| 4,23 – 6,28        | 4      |
| 6,29 – 12          | 5      |

| <i>Altitude</i>    |        |
|--------------------|--------|
| Intervalo (metros) | Classe |
| -19,3 – -4,35      | 3      |
| -4,34 – 2,29       | 2      |
| 2,3 – 9,39         | 1      |
| 9,4 – 16,5         | 2      |
| 16,6 – 22,9        | 4      |
| 23 – 41,2          | 5      |

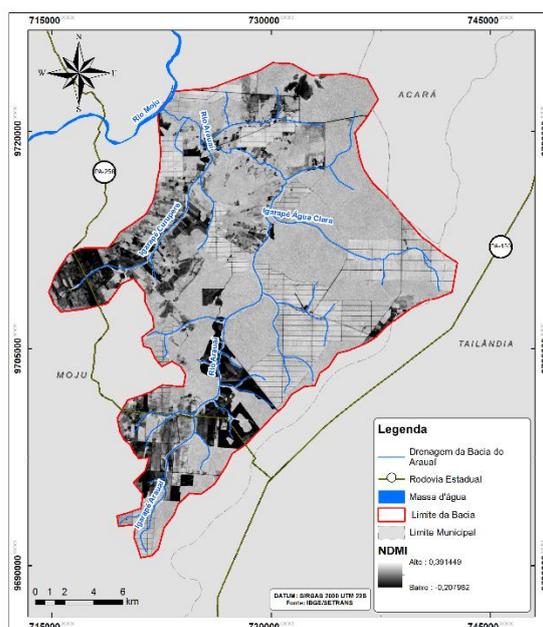
Figura 18. Mapas temáticos dos indicadores do fator hidrometeorológico: (a) Distância de Corpos Hídricos (metros); (b) TST (°C); (c) NDMI.



(a)

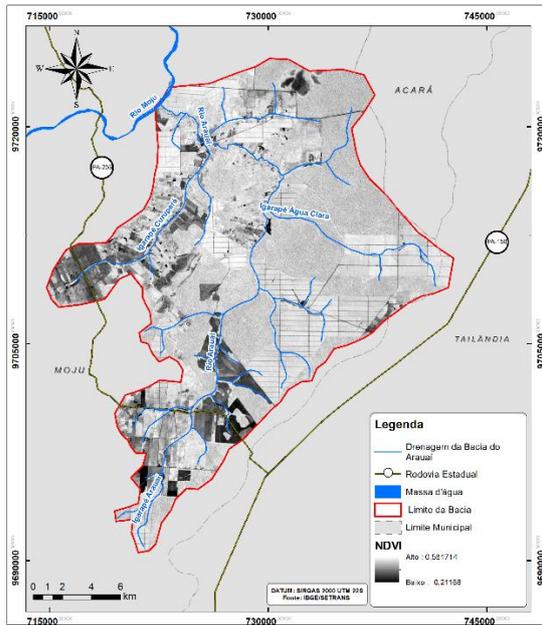


(b)

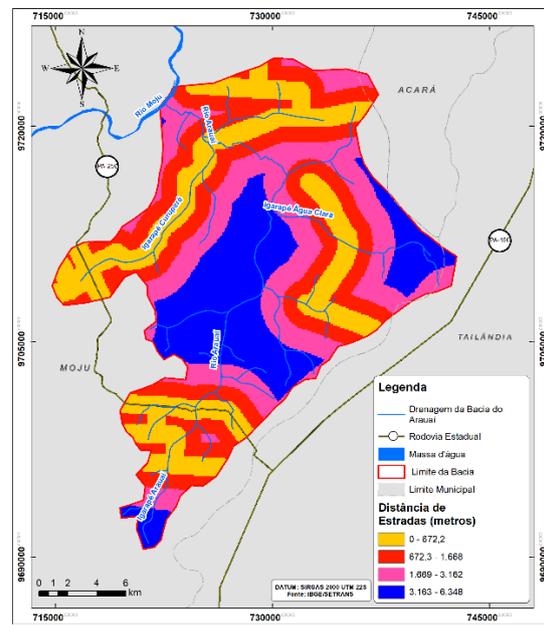


(c)

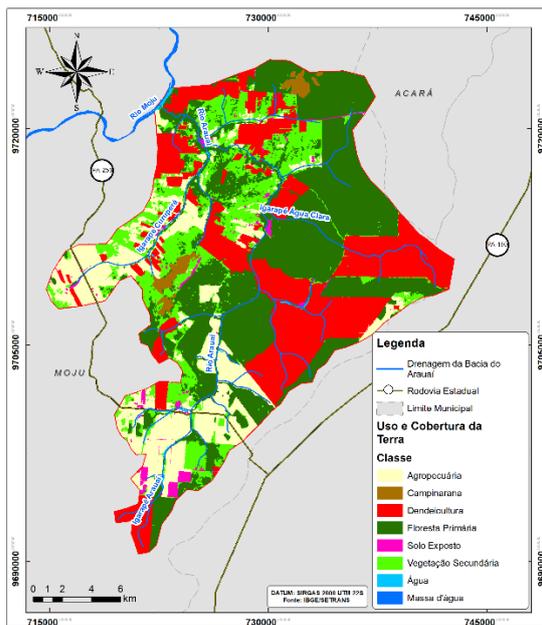
Figura 19. Mapas temáticos dos indicadores do fator antrópico: (a) NDVI; (b) Distância de Estradas (metros); (c) Mudança de Cobertura e Uso da Terra.



(a)

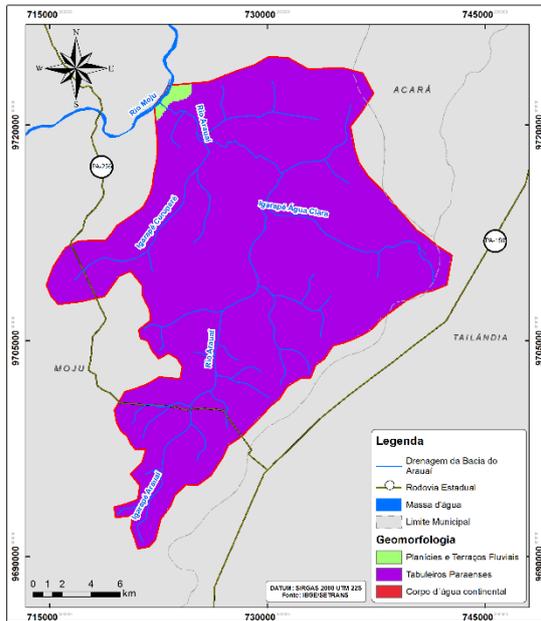


(b)

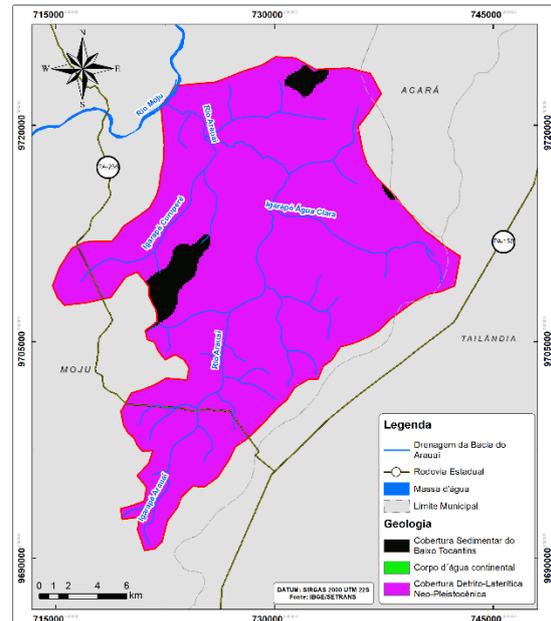


(c)

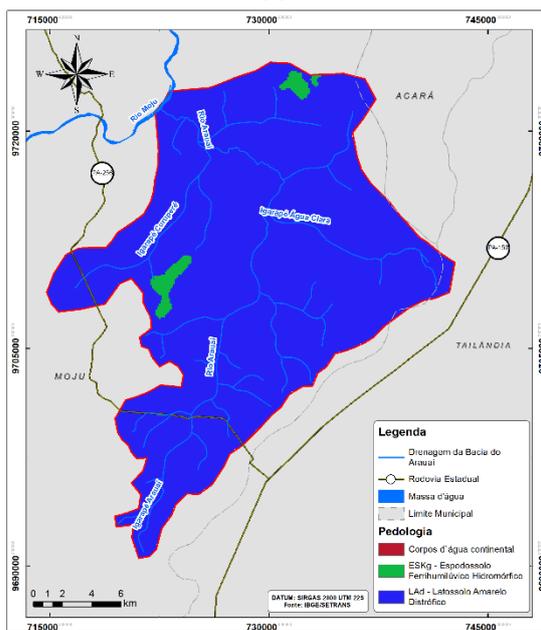
Figura 20. Mapas temáticos dos indicadores do fator natural: (a) Geomorfologia; (b) Geologia; (c) Pedologia.



(a)

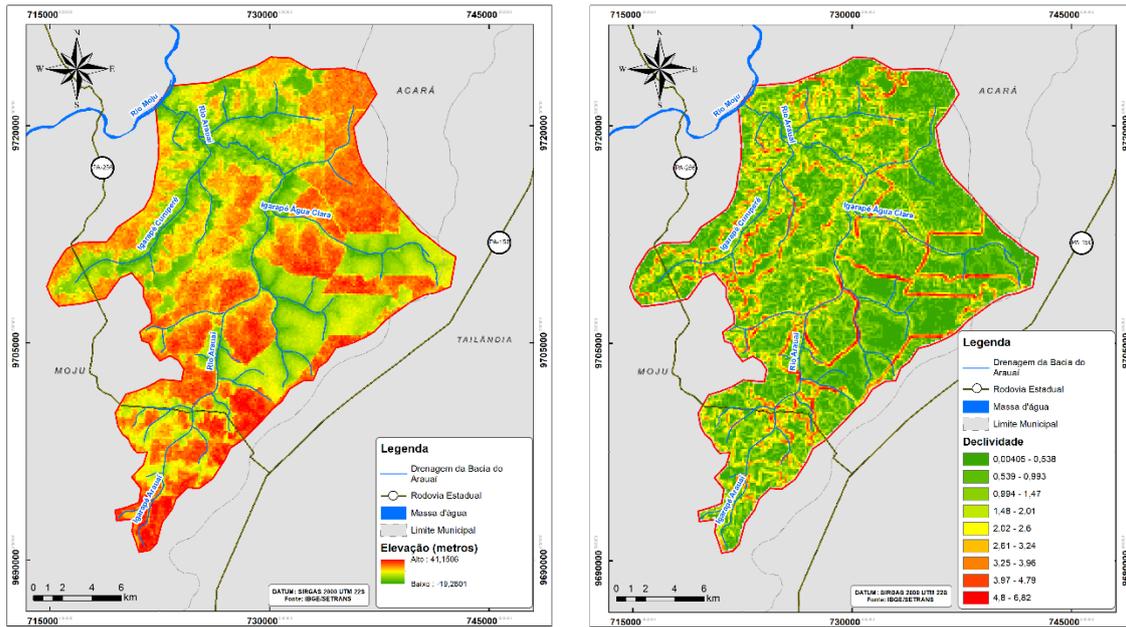


(b)



(c)

Figura 21. Mapas temáticos dos indicadores do fator topográfico: (a) Elevação; (b) Declividade.



(a)

(b)