

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL  
CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

LEONARDO ROCHA SANTIN

**CORRELAÇÃO ENTRE OS SERAIS DO PARQUE NACIONAL DAS ARAUCÁRIAS  
E SEUS RESPECTIVOS ÍNDICES DE REFLECTÂNCIA VEGETATIVA, NA  
PERSPECTIVA DA LÓGICA FUZZY**

Florianópolis

2024

LEONARDO ROCHA SANTIN

**CORRELAÇÃO ENTRE OS SERAIS DO PARQUE NACIONAL DAS ARAUCÁRIAS  
E SEUS RESPECTIVOS ÍNDICES DE REFLECTÂNCIA VEGETATIVA, NA  
PERSPECTIVA DA LÓGICA FUZZY**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em  
Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico  
da Universidade Federal de Santa Catarina como  
requisito para a obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Sanitária e Ambiental  
Orientadora: Pesquisadora Tamires Liza Deboni

Florianópolis

2024

Santin, Leonardo Rocha

Correlação entre os serais da Mata Atlântica e seus respectivos índices de reflectância vegetativa, na perspectiva da lógica fuzzy / Leonardo Rocha Santin ; orientadora, Tamires Liza Deboni, 2024.

68 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Lógica fuzzy. 3. Sucessão ecológica. 4. Sensoriamento remoto. I. Deboni, Tamires Liza. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Título.

Leonardo Rocha Santin

**Correlação entre os serais da Mata Atlântica e seus respectivos índices de reflectância  
vegetativa, na perspectiva da lógica fuzzy**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel  
em Engenharia Sanitária e Ambiental e aprovado em sua forma final pelo Curso de  
Engenharia Sanitária e Ambiental

Florianópolis, 12 de dezembro de 2024.

---

Prof. Bruno Segalla Pizzolatti, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Pesquisadora Tamires Liza Deboni, Ms.(a)  
Orientadora  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof.(a) Patrícia Kazue Uda, Dr.(a)  
Avaliadora  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Pesquisador Abraão da Silva Pereira, Ms.  
Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado a Hagos  
Nascimento Xavier (in memoriam).

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e familiares por todo o apoio e suporte dado, o qual viabilizou toda esta caminhada.

Ao Nildo e Lucas, agradeço imensamente pelo suporte técnico, sem o qual a realização desta pesquisa seria extremamente prejudicada.

Agradeço à disciplina de Física Experimental I, que viabilizou estabelecer os laços que compartilho com Nati, Maria e Ivana, sem as quais minha história seria reescrita sem muitas das amenidades que aqui se encontram.

Aos colegas de *Terapia ENS Grupo*, no ocaso da graduação, vocês foram fundamentais para encontrar amigos e me sentir acolhido novamente no ambiente acadêmico.

À Taisa, Bruna e Renato, agradeço por me adotarem em suas casas, as quais se tornaram a minha família, mesmo em lugares e momentos tão improváveis.

Aos demais moradores de todas as temporadas da Casona, obrigado por amenizar tantos céus e me proporcionar alguns dos momentos preferidos da minha vida.

Aos integrantes presentes e passados do conjunto *sueste*, sou grato pelo restante dos meus momentos preferidos.

Aos amigos feitos na Defesa Civil, MPB e PB, agradeço por tornarem os dias mais leves em meio a tantos aprendizados e experiências.

Ao Dario, meu melhor amigo, agradeço pelas provocações de décadas, através das quais foram compostas tantas linhas e notas.

À Phoebe, minha melhor amiga, agradeço pelos longos passeios, caminhadas, corridas, mordidas, amparos, cafunés e saudades que me moveram por muitas vezes.

À Tamires, minha orientadora, agradeço imensamente pela paciência e iluminação fornecida em meio a trajetória construída ao longo deste ano. Ele foi extremamente desafiador e considero que tive sorte de poder contar com o seu direcionamento.

Agradeço aos professores que me inspiraram a acreditar nas possibilidades que esta graduação e profissão proporcionam, principalmente nas vezes em que questioneei minha continuidade nela.

Por fim, agradeço à UFSC. Tal qual o Cortiço de Aluísio Azevedo ou o Mar de Herman Melville, você foi muito mais do que um lugar ao longo destes anos.

## RESUMO

A pesquisa investiga a viabilidade da aplicação de sistemas de lógica fuzzy na distinção e determinação dos estágios sucessionais no Parque Nacional das Araucárias (PNA), em Santa Catarina, a partir de informações extraídas de bandas de reflectância, como os índices NDVI, EVI, NDMI, VARI e DVI. A lógica fuzzy se baseia em conjuntos infinitamente-valorados, nos quais os objetos são qualificados com um nível de pertencimento, em detrimento de estarem contidos ou não de maneira categórica e binária. Assim, ela é considerada adequada para lidar com problemas nos quais os limites entre as classes e conjuntos propriamente ditos, são nebulosos ou difusos. Os dados de entrada foram provenientes de leituras do LANDSAT-8 e do levantamento do uso do solo, elaborado em uma das etapas prévias ao Plano de Manejo do PNA. O estudo investiga a correlação entre tais índices e os serais do PNA a partir da aplicação de bibliotecas do python especializadas na lógica fuzzy e possibilita analisar suas aplicações e limitações. Embora a lógica fuzzy seja notória por lidar bem com dados em sistemas onde há grande incerteza, os resultados obtidos revelaram um índice de acerto global de apenas 23,17%. Tal resultado sugere que o treinamento do algoritmo não foi refinado o suficiente, ou que os dados utilizados não são adequados para tal aplicação, tendo em vista a similaridade dos valores dos índices, entre os estágios sucessionais impediram que áreas fossem agrupadas sob as classificações descritas pela CONAMA.

**Palavras-chave:** Lógica fuzzy; Sucessão ecológica; Sensoriamento remoto.

## ABSTRACT

The research investigates the feasibility of applying fuzzy logic systems to distinguish and determine successional stages in the Araucárias National Park (PNA) in Santa Catarina, based on information extracted from reflectance bands such as the NDVI, EVI, NDMI, VARI, and DVI indices. Fuzzy logic is based on infinitely-valued sets, where objects are assigned a degree of membership, rather than being binarily included or excluded. Consequently, it is considered particularly suitable for addressing problems in which the boundaries between classes and sets are ambiguous or diffuse. The input data were obtained from LANDSAT-8 readings and land use surveys conducted as part of a preliminary stage of the PNA's Management Plan. The study investigates the correlation between these indices and the successional stages within the PNA, utilizing Python libraries specialized in fuzzy logic, thus enabling an analysis of its applications and limitations. While fuzzy logic is renowned for its capacity to manage data in systems characterized by considerable uncertainty, the results revealed a global accuracy of only 23.17%. This finding suggests that either the algorithm's training was insufficiently refined, or the data employed were not suitable for such an application, as the similarity in index values between the successional stages prevented proper grouping of areas under the classifications outlined by CONAMA.

**Keywords:** Fuzzy logic. Ecological succession. Remote sensing.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Floresta em estágio secundário inicial de sucessão .....	22
Figura 2 - Floresta em estágio secundário médio de sucessão .....	23
Figura 3 - Floresta em estágio secundário avançado de sucessão .....	24
Figura 4 - Floresta primária pouco explorada .....	24
Figura 5 - Imagem multi-bandas gerada pelo LANDSAT 7 em 2008. ....	30
Figura 6 - Imagem multi-bandas gerada pelo LANDSAT 8 em 2013. ....	30
Figura 7 - Representação de uma função de pertinência gaussiana. ....	35
Figura 8 - Representação de uma função de pertinência trinagular. ....	35
Figura 9 - Limite territorial do Parque Nacional das Araucárias .....	39
Figura 10 - Imagens obtidas do Parque Nacional das Araucárias. ....	41
Figura 11 - Reprodução do mapa de uso do solo do PNA, de acordo com o estágio sucessional da floresta, áreas de reflorestamento e de pastagens/agricultura e solo exposto... 42	42
Figura 12 - Mapa de tipologias extraídas do Plano de Manejo do Parque Nacional das Araucárias .....	49
Figura 13 - Boxplot para o índice NDVI.....	50
Figura 14 - Mapa do índice NDVI .....	51
Figura 15 - Boxplot para o índice EVI.....	52
Figura 16 - Mapa do índice EVI.....	53
Figura 17 - Boxplot para o índice NDMI.....	54
Figura 18 - Mapa do índice NDMI.....	55
Figura 19 - Boxplot para o índice VARI.....	56
Figura 20 - Mapa do índice VARI.....	57
Figura 21 - Boxplot para o índice DVI.....	58
Figura 22 - Mapa do índice DVI .....	59
Figura 23 - Modelos finais para as simulações baseadas na lógica fuzzy.....	61

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resumo dos itens presente na Resolução Conama de nº. 004 de 4 de maio de 1994 .....	24
--	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Uso do solo na área do PNA, de acordo com o estágio sucessional da floresta, áreas de reflorestamento e de pastagens/agricultura e solo exposto.....	27
Tabela 2 - Resolução espectral das bandas do satélite LANDSAT-8 .....	39
Tabela 3 - Quantidade de presenças dos conjuntos.....	47
Tabela 4 - Comparação dos resultados finais das quantidades de pixels entre a tipologia consultadas e simuladas.....	60
Tabela 5 - Relação de acertos por tipologia .....	60

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CONAMA Conselho Nacional do Meio Ambiente  
DAP Diâmetro à Altura do Peito  
DVI Índice de Diferença de Vegetação  
EMBRAPA Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
ERTS *Earth Resources Technology Satellite*  
EVI Índice de Vegetação Realçado  
GCI Índice de Clorofila Verde  
GNDVI Índice de Vegetação da Diferença Normalizada Verde  
IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
ICMBIO Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade  
IDE Ambiente de Desenvolvimento Integrado  
IFOV Campo de Visão Instantâneo  
INPE Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
ISA Instituto Socioambiental  
MMA Ministério do Meio Ambiente  
MSS Sistema de Escaneamento Multiespectral  
NDMI Índice de Vegetação da Diferença Normalizada por Umidade  
NDVI Índice de Vegetação por Diferença Normalizada  
NIR Infravermelho Próximo  
PNA Parque Nacional das Araucárias  
PNUMA Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente  
RNDVI Índice de Vegetação da Diferença Normalizada Vermelha  
SAVI Índice de Vegetação Ajustado ao Solo  
SIG Sistema de Informações Geográficas  
SLC Corretor da Linha de Escaneamento  
SNUC Sistema Nacional de Unidades de Conservação  
SR Reflectância de Superfície  
SWIR-1 Infravermelho de Ondas Curtas  
UF Unidade da Federação  
USGS *United States Geological Survey*  
VARI Índice Resistente à Atmosfera na Região Visível

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	Objetivo Geral .....	16
1.2	Objetivos Específicos .....	17
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>18</b>
2.1	Histórico, importância e Perda da biodiversidade da mata atlântica.....	18
2.2	Legislação e políticas públicas para a mata atlântica .....	19
2.3	Classificação dos Estágios Sucessionais .....	20
<b>2.3.1</b>	<b>Estágios sucessionais na perspectiva da CONAMA Nº. 4 de 1994.....</b>	<b>21</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Estágios sucessionais sob outra abordagem de classificação .....</b>	<b>26</b>
2.4	Área de Estudo.....	26
2.5	Sensoriamento remoto e índices de Vegetação .....	27
<b>2.5.1</b>	<b>Índices Utilizados na Elaboração da Pesquisa .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Operação e coleções de imagens da série LANDSAT.....</b>	<b>29</b>
2.6	Lógica fuzzy e suas aplicações .....	31
<b>2.6.1</b>	<b>Definições.....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>2.6.2</b>	<b>Lógica fuzzy.....</b>	<b>33</b>
<b>2.6.3</b>	<b>Aplicações Relacionadas .....</b>	<b>33</b>
<b>2.6.4</b>	<b>Instrumentos da lógica fuzzy .....</b>	<b>34</b>
2.7	Estudos Relacionados .....	36
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>38</b>
3.1	Área de Estudo.....	38
3.2	Base de Dados .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
3.3	TRATAMENTO DOS DADOS COM Google Earth Engine .....	40
3.4	MANIPULAÇÃO DAS IMAGENS NO QGis .....	41
3.5	Scripts para o Processamento dos Dados .....	42

<b>3.5.1</b>	<b>Estruturação dos Dados .....</b>	<b>42</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Cálculo dos Índices de Reflectância Vegetativa.....</b>	<b>43</b>
<b>3.5.3</b>	<b>Implementação da Lógica Fuzzy .....</b>	<b>45</b>
<b>3.5.4</b>	<b>Processamento para Resultados Finais.....</b>	<b>47</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>48</b>
4.1	Base de Dados .....	48
4.2	Análise das imagens no QGis .....	48
4.3	Scripts para o Processamento dos Dados .....	49
<b>4.3.1</b>	<b>Cálculo dos Índices de Reflectância Vegetativa.....</b>	<b>49</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Sobre a implementação da lógica fuzzy .....</b>	<b>59</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>62</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>63</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A partir da modelagem de dados, a perda de biodiversidade da Mata Atlântica é associada de maneira direta ao decréscimo da riqueza da sua fauna característica (BRANCO et al., 2021). Tal apontamento é coerente com a tendência histórica deste bioma, tendo em vista que, em 2023, sua área de ocupação em caráter intacto de preservação representava apenas 12,4% da área original em território nacional e 22,8% em território catarinense, de acordo com o Atlas dos Remanescentes Florestais da Mata Atlântica, publicado em conjunto pela Fundação SOS Mata Atlântica e pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. Para garantir a conservação do bioma, o patamar mínimo de cobertura do mesmo deve atingir 30%, enquanto a Mata Atlântica cobre apenas 24% da sua área original, já considerando vegetações secundárias (SOS MATA ATLÂNTICA; INPE, 2024).

O monitoramento deste bioma pelo INPE foi iniciado em 1985, sucedendo em apenas quatro anos a promulgação da Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), e antecedendo em três anos a Constituição Federal (CF) de 1988. As atualizações gradativas das tecnologias, técnicas e metodologias, e os anos de levantamento, aliados à crescente conscientização pela questão ambiental, proporcionaram embasamento e contexto favorável para a elaboração de uma legislação específica para a Mata Atlântica. Em 2006, foi sancionada a Lei de número 11.428, de 22 de dezembro de 2006, mais conhecida como a Lei da Mata Atlântica (BRASIL, 2006).

A aplicação conjunta de instrumentos legais e de um monitoramento minucioso estabelece uma relação simbiótica. O principal objetivo desta relação é a manutenção e a recuperação da integridade ecológica. Além do caráter restritivo, o texto da Lei da Mata Atlântica atribui, em seu quarto artigo, ao Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), a caracterização regional do bioma entre vegetação primária e secundária e, para esta última, seus estágios de regeneração sucessional a partir de nove parâmetros básicos (BRASIL, 2006).

Há uma uniformidade de características entre diferentes áreas de um mesmo bioma, as quais se enquadram nos mesmos estágios sucessionais. Assim, é coerente que se segmente os estágios com base em parâmetros ecológicos, como se faz nas resoluções do CONAMA. No entanto, a redação dos gera ambiguidades decisórias, pelo uso de termos passíveis de interpretação e pela sobreposição de intervalos entre os parâmetros, introduzindo arbitrariedade nos diagnósticos (BRESSANE et al., 2023).

Deste embaraço, se justifica a elaboração do presente trabalho, que investiga alternativas metodológicas para a classificação seral a partir dos parâmetros agregados, correlacionando os estágios sucessionais com o sensoriamento remoto por meio da aplicação da lógica fuzzy em porções da Mata Atlântica Catarinense.

A porção selecionada como área de estudo foi o Parque Nacional das Araucárias, por possuir todos os estágios de sucessão ecológica delimitados em seu plano de manejo e ser de extrema relevância o estado de Santa Catarina.

Apesar de escassos, outros trabalhos abordam a classificação dos estágios sucessionais a partir de índices de vegetação provenientes do sensoriamento remoto. Com séries temporais de Índice de Vegetação da Diferença Normalizada por Umidade (NDMI), Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e Índice de Vegetação Realçado (EVI) e a análise que as correlacionem com uma base de dados, é possível obter resultados que superam a taxa de assertividade de 90% (TEIXEIRA et al., 2019) (BERVEGLIERI et al., 2021).

Uma abordagem que trouxe resultados promissores é baseada na aplicação da lógica fuzzy. Seu uso parte do aprendizado de máquina e é recomendado para lidar com sistemas complexos, especialmente em cenários marcados por graus de incerteza, como os descritos anteriormente (BRESSANE et al., 2023).

Pela lógica se basear em conjuntos infinitamente valorados (KLIR; YUAN, 1995), ela foi explorada e adaptada para lidar com problemas subjetivos e incertos, ou seja, atividades que requerem ponderação lógica. Tais tarefas são comumente realizadas por seres humanos, contudo ao tratá-las sob a ótica da lógica fuzzy e com o auxílio da computação flexível, resultados refinados, robustos e rápidos são viabilizados (BARROS; BASSANEZI, 2010).

A lógica fuzzy, é flexível diante de nuances e incertezas, as quais são presentes nos dados ambientais, se apresenta de maneira promissora para superar as limitações de abordagens tradicionais de classificação ecológica.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Investigar a viabilidade da aplicação de sistemas de lógica fuzzy, na distinção e determinação dos estágios sucessionais no Parque Nacional das Araucárias (PNA), em Santa Catarina, a partir de dados provenientes da leitura das bandas reflectivas no espectro eletromagnético.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

a) Georreferenciar e calcular índices de vegetação para *pixels*, associando-os, à classificação de sucessão ecológica determinada pelo Plano de Manejo do Parque Nacional das Araucárias;

b) Elaborar um sistema de interferência fuzzy que gere classificações de estágios sucessionais, a partir de índices de vegetação;

c) Verificar a taxa de assertividade sistema elaborado em contraste com a classificação presente no Plano de Manejo, a qual é baseada nos critérios da resolução CONAMA nº 4 de 1994.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 HISTÓRICO, IMPORTÂNCIA E PERDA DA BIODIVERSIDADE DA MATA ATLÂNTICA

No contexto da valorização e preservação ecológica, em sua riqueza e diversidade, são definidos e estabelecidos pontos críticos de biodiversidade, ou “*hotspots*”, como locais que demandam atenção e cuidado especial. Aos biomas com elevadas concentrações de espécies endêmicas e que se encontram ameaçadas devido a pressões ecológicas, são atribuídos esta terminologia. A condição de vulnerabilidade de tais ecossistemas se dá pela noção de que a sua degradação é acompanhada de episódios massivos de extinção. Hoje, o conceito é associado a 36 biomas e desde sua elaboração ao final da década de 1980, a Mata Atlântica já figurava entre elas (MYERS, 1988).

Estima-se que 9,5% das espécies conhecidas no mundo possuam registro no Brasil (LEWINSOHN; PRADO, 2005) e a Mata Atlântica, como uma das áreas de maior biodiversidade do planeta, contribui para que tal patamar seja atingido. Na fração que compete à Mata Atlântica, há cerca de 850 espécies de aves, 370 de anfíbios, 350 de peixes, 270 de mamíferos e 200 de répteis, além de 20 mil das 50 mil espécies de plantas são encontradas distribuídas entre diversas formações florestais e ecossistemas associados (BRASIL; Ministério do Meio Ambiente [MMA], 2010).

Considerando a vasta gama de serviços ecossistêmicos que um ambiente tão rico como este proporciona, pode-se afirmar que sua relevância não se limita apenas à riqueza de sua biota. Quase 70% da população brasileira se beneficia de maneira direta e indireta de seus serviços ecossistêmicos, tendo em vista a regulação do clima, composição das bacias hidrográficas e inclusive destinos turísticos (BRASIL; MMA, 2010).

O desmatamento em curso empobrece a fauna e atenua o desequilíbrio dos ecossistemas, resultando em uma maior vulnerabilidade e risco de extinção. Esta tendência é agravada pela formação de um número incompatível de corredores ecológicos, para a quantidade de ilhas de florestas que se formam. Invariavelmente, o impacto na biodiversidade se intensifica à medida que o desmatamento avança (BRANCO et al., 2021).

De acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, desde a década de 1970, o INPE capta imagens geradas pela Missão *Land Remote Sensing Satellite* (LANDSAT), através da sua antena de recepção em Cuiabá (EMBRAPA TERRITORIAL, 2024). Já na

década seguinte, o instituto iniciou o monitoramento da distribuição e variação da cobertura vegetal nativa da Mata Atlântica em 1985 e no ano seguinte a ONG SOS Mata Atlântica foi fundada.

A partir de 1988, as duas instituições unem forças para consolidar os dados nos Atlas dos Remanescentes Florestais, partindo de uma frequência quinquenal e chegando na frequência atual de publicação anual, tendo em vista os avanços da tecnologia e relevância de se obter informações atualizadas.

Em 2023, o bioma ocupava apenas 12,4% de sua área original em território nacional e 22,8% do território catarinense, ficando aquém do limiar de 30% de conservação, apontada como a faixa mínima para a conservação das florestas. As áreas compostas por maciços florestais são ainda mais escassas, ao não representar mais de 8,5% da área original (SOS MATA ATLÂNTICA; INPE, 2024).

Ao que se trata especificamente do estado de Santa Catarina, no período entre 2022 e 2023, foi observado o decréscimo da área da mata atlântica em 52 hectares, um valor 86% menor do que o registrado no período compreendido entre 2021 e 2022 (SOS MATA ATLÂNTICA; INPE, 2024).

## 2.2 LEGISLAÇÃO E POLÍTICAS PÚBLICAS PARA A MATA ATLÂNTICA

Dentre os marcos mais significativos da legislação para a conservação do Bioma Mata Atlântica, temos a Lei nº 11.428 de 2006, conhecida como a Lei da Mata Atlântica. Em seu texto, são estabelecidos mecanismos para garantir a sua proteção, uso sustentável e recuperação. Dentre suas disposições, há a delegação ao CONAMA da responsabilidade de caracterizar o bioma da Mata Atlântica por meio de resoluções, tendo em vista suas peculiaridades regionais (BRASIL, 2006).

É de vital importância que se sustente um rigoroso e contínuo monitoramento, através do qual, instrumentos legais e mecanismos de controle contribuam para a integridade ecológica do bioma (BRASIL; MMA, 2010).

Outros marcos legais contribuem diretamente com esta temática, como as Unidades de Conservação, instituídas pelo Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC) através da Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000 (BRASIL, 2000), as Áreas de Preservação Permanente e Reserva Legal, pelo novo Código Florestal através da Lei 12.651, de 25 de maio de 2012 (BRASIL, 2012) e as Terras Indígenas, pelo Estatuto do Índio através da Lei nº 6.001, de 19 de

dezembro de 1973 (BRASIL, 1973), que detalham as restrições e norteiam a recuperação da integridade das áreas de Mata Atlântica de áreas indígenas (BRASIL; MMA, 2010).

O controle de acesso e de atividades, o isolamento e a delegação da administração e usufruto exclusivo de terras à povos indígenas são medidas coerentes, mediante as diferenças práticas e conceituais nas relações com o meio ambiente para civilizações ocidentais e indígenas (PAPÁ; BRITOS, 2023).

A Constituição da República Federativa do Brasil de 1988, em seu Artigo n. 225, alinha-se aos princípios estabelecidos no Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), ao garantir o direito a um meio ambiente ecologicamente equilibrado e ao incumbir responsabilidade ao Estado e à sociedade por sua preservação (BRASIL, 1988).

Na prática, há desafios para a aplicação das legislações descritas, devido às incertezas ou falta de clarezas conceituais. Tais questões podem comprometer a execução de instrumentos de controle, como o licenciamento ambiental e trazer desdobramentos que ameacem a biodiversidade (PRADO et al., 2014).

### 2.3 CLASSIFICAÇÃO DE ESTÁGIOS SUCESSIONAIS DA MATA ATLÂNTICA

O CONAMA foi instituído inicialmente através da Política Nacional do Meio Ambiente, a qual foi estabelecida pela Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981 (BRASIL, 1981). Dentre outras atribuições, ele foi incumbido de publicar resoluções para cada uma das unidades da federação que possuísse, em seu território, quaisquer porções do bioma Mata Atlântica. Desta forma, há 17 resoluções específicas referentes aos estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Espírito Santo, Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Paraná, Rio de Janeiro, Rio Grande do Norte, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Sergipe e São Paulo.

Estas resoluções acumulam as definições para Vegetação Primária e Secundária, ou em Regeneração. Para esta última, são descritos os critérios mínimos necessários para que uma área do bioma tenha seu estágio de regeneração definido como Inicial, Médio ou Avançado (BRASIL, 2006).

De acordo com segundo parágrafo do quarto artigo da Lei da Mata Atlântica, os parâmetros básicos para a análise dos estágios sucessionais de vegetações secundárias são: fisionomia; estratos predominantes; distribuição diamétrica e altura; existência, diversidade e quantidade de epífitas; existência, diversidade e quantidade de trepadeiras; presença, ausência

e características da serapilheira; sub-bosque; diversidade e dominância de espécies; e espécies vegetais indicadoras (BRASIL, 2006).

Para o estado de Santa Catarina, o documento de referência é a Resolução Conama de nº. 004 de 1994. Como vegetação primária, são consideradas áreas com alta biodiversidade e impacto humano mínimo em suas características originais de estrutura e de espécies. Também são observados aspectos mensuráveis como a área basal média ser maior que 20 metros quadrados por hectare, diâmetro à altura do peito (DAP) médio superior a 25 centímetros e altura média superior a 20 metros.

Por sua vez, a vegetação secundária é considerada aquela que surge a partir de processos naturais posteriores à perda parcial ou total da vegetação primária (CONAMA; BRASIL, 1994). Todavia, para efeito legal, uma área não regride em sua classificação, caso sua vegetação seja subtraída pelo efeito de queimadas, desmatamento ou demais intervenções não autorizadas ou licenciadas (BRASIL, 2006).

Mesmo da perspectiva de outros estudos, sistemas de vegetações secundárias seguem sendo vinculadas diretamente à ocorrência de intervenções humana. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), tais alterações sobre vegetações primárias geralmente têm como finalidade o uso da terra de mineração, agricultura ou pecuária (IBGE, 2012a).

### **2.3.1 Estágios sucessionais na perspectiva da CONAMA Nº. 4 de maio de 1994**

A seguir são descritos os itens que constam em cada um dos estágios sucessionais delimitados pela CONAMA, para o estado de Santa Catarina.

Uma vegetação secundária se enquadra no estágio inicial de regeneração quando a área basal média é de até oito metros quadrados por hectare, com fisionomia herbáceo-arbustiva de porte baixo e altura total média de até quatro metros, podendo ter sua cobertura vegetal variando entre aberta e fechada. Quanto às suas espécies lenhosas, o DAP médio é de até oito centímetros.

Além disso, para o primeiro estágio sucessional, quando ocorre a presença de epífitas, ela se configura em uma baixa diversidade de líquens, briófitas e pteridófitas. As trepadeiras, quando ocorrerem, geralmente tratam-se de herbáceas. A respeito da sua camada de serapilheira, quando existente, é fina e com pouco sinal de decomposição. A diversidade biológica é variável neste estágio, com poucas espécies arbóreas ou arborescentes, mas elevada diversidades de espécies pioneiras. Este estágio não apresenta sub-bosques e conta com três

classes de espécies indicadoras a depender da sua formação florestal entre Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Mista e Floresta Estacional Decidual (CONAMA; BRASIL, 1994).

A Figura 1 traz um registro de como aparenta uma vegetação secundária em estágio inicial de sucessão ecológica.

Figura 1 - Floresta em estágio secundário inicial de sucessão



Fonte: Plano de Manejo do Parque Nacional das Araucárias (MMA; ICMBIO, 2010)

A vegetação secundária se enquadra no estágio médio de regeneração quando a área basal média é de até 15 metros quadrados por hectare, com fisionomia predominantemente arbórea e arbustiva, em estratos diferenciados e altura total média de até 12 metros, também podendo ter sua cobertura vegetal variando entre aberta e fechada, aliada à presença eventual de indivíduos emergentes. Quanto às suas espécies lenhosas, o DAP médio é de até 15 centímetros.

Em comparação ao estágio inicial, este estágio sucessional passa a contar com uma presença mais numerosa e diversa de epífitas, principalmente para as florestas ombrófilas. Em relação às trepadeiras, sua ocorrência ainda não é considerada mandatória, mas, quando encontradas, são predominantemente lenhosas. A respeito da sua camada de serapilheira, é existente e varia a depender da estação e localização geográfica. A diversidade biológica é

significativa e conta com sub-bosque. Este estágio também conta com três classes de espécies indicadoras a depender da sua formação florestal (CONAMA; BRASIL, 1994).

A Figura 2 traz um registro de como aparenta uma vegetação secundária em estágio médio de sucessão ecológica.

Figura 2 - Floresta em estágio secundário médio de sucessão



Fonte: Plano de Manejo do Parque Nacional das Araucárias (MMA; ICMBIO, 2010)

Por fim, o estágio avançado de regeneração conta com área basal média de até 20 metros quadrados por hectare, com fisionomia arbórea, altura média de até 20 metros e árvores emergentes. Ela também conta com a formação de dossel fechado e relativamente uniforme, com copas superiores amplas e distribuição diamétrica de grande amplitude, uma vez que o DAP médio pode chegar a até 25 centímetros.

Neste terceiro e último estágio sucessional, as epífitas, são consideradas abundantes e variadas, principalmente para as florestas ombrófilas. Quanto às trepadeiras, são geralmente lenhosas e mais abundantes na floresta estacional. A camada de serapilheira é abundante. Sua diversidade biológica é muito grande, dado sua complexidade estrutural, entre os estratos herbáceos, arbustivos e arbóreo. As espécies indicadoras são divididas entre os mesmos três tipos de formação florestal, com a possibilidade de ocorrência de espécies dominantes. Desta

forma, sua fisionomia se assemelha à vegetação primária, com um sub-bosque menos expressivo do que no estágio médio (CONAMA; BRASIL, 1994).

A Figura 3 traz um registro de como aparenta uma vegetação secundária em estágio avançado de sucessão ecológica. Por fim, a Figura 4 apresenta a floresta primária.

Figura 3 - Floresta em estágio secundário avançado de sucessão



Fonte: Plano de Manejo do Parque Nacional das Araucárias (MMA; ICMBIO, 2010)

Figura 4 - Floresta primária pouco explorada



Fonte: Plano de Manejo do Parque Nacional das Araucárias (MMA; ICMBIO, 2010)

As informações descritas anteriormente se encontram expostas de maneira objetiva no Quadro 1.

Quadro 1 - Resumo dos itens presente na Resolução Conama de n°. 004 de 4 de maio de 1994

<b>Parâmetros</b>	<b>Inicial</b>	<b>Médio</b>	<b>Avançado</b>
Área basal média por hectare	Até 8 m <sup>2</sup> /ha	Até 15 m <sup>2</sup> /ha	Até 20 m <sup>2</sup> /ha
Fisionomia	Herbáceo / arbustiva de porte baixo	Arbórea e arbustiva predominando sobre herbáceas	Arbórea
Altura total média	Até 4 m	Até 12 m	Até 20 m
Espécies emergentes	-	Ocorrência eventual	Ocorrendo com diferentes graus de intensidade
Dossel	-	-	Fechado e relativamente uniforme

<b>Parâmetros</b>	<b>Inicial</b>	<b>Médio</b>	<b>Avançado</b>
Distribuição diamétrica	De pequena amplitude	De amplitude moderada	De grande amplitude
DAP	Até 8 cm	Até 15 cm	Até 25 cm
Epífitas	Se existente, com baixa diversidade	Presença maior que no estágio inicial	Abundantes e variadas
Trepadeiras	Se presentes, geralmente herbáceas	Predominantemente lenhosas, quando presentes	Geralmente lenhosas
Serapilheira	Quando presente, muito fina e pouco decomposta	Presente e de espessura variada	Abundante
Diversidade biológica	Variável	Significativa	Muito grande
Complexidade estrutural	Espécies pioneiras abundantes	Pode ser constituído de estratos diferentes	Estratos herbáceos, arbustivos e arbóreo
Sub-bosque	Ausente	Presente	Menos expressivo
Espécies indicadoras	Diversas	Diversas	Diversas

Fonte: adaptação das informações contidas na Resolução Conama de nº. 004, de 1994 (CONAMA; BRASIL, 1994).

Embora áreas degradadas respondam de modos distintos, a vegetação secundária que surge, se manifesta de maneira compatível com os parâmetros ecológicos do ambiente. Tal uniformidade justifica a existência de agrupamentos para os diferentes estágios sucessionais, salvo a questão temporal, influenciada pelo tipo de degradação sofrida pela área (IBGE, 2012a).

Do que foi descrito anteriormente pela CONAMA, a respeito dos parâmetros levados em consideração para cada estágio sucessional, itens como a área basal média sustentam uma faixa de aceitabilidade em que mais de um estágio poderia ser considerado. Outros itens se baseiam em subjetividades, tendo em vista a descrição da diversidade biológica, a qual é diferenciada entre os estágios por termos como “variável”, “significativa” e “muito grande” (CONAMA; BRASIL, 1994).

Há, também, um desbalanço entre a quantidade de itens para avaliação. O estágio inicial e médio de regeneração necessita de dez itens para avaliação, enquanto o estágio avançado necessita de catorze. Assim, diversos parâmetros das resoluções apresentam certa margem e conseqüente sobreposição, como exposto para o caso da área basal, e enseja incertezas no processo de classificação (BRESSANE et al., 2023).

A flexibilização do intervalo de tolerância entre os diferentes estágios é uma recorrência que se justifica para viabilizar a adoção de um número reduzido de classes. O preço para tal adoção, diante de um bioma tão rico e diverso entre suas diversas formações florestais e ecossistemas associados, é a adição de um grau de arbitrariedade nos resultados.

Da não existência de instruções claras, que atribuam pesos e relevância para cada parâmetro descrito nos itens, recai a cada técnico balizar a classificação da porção de vegetação analisada mediante o levantamento feito.

### **2.3.2 Estágios sucessionais de Mata Atlântica conforme Manual Técnico da Vegetação Brasileira**

Ainda que outros autores façam leituras similares, há abordagens diferentes para a segmentação da sucessão natural, como o descrito no Manual Técnico da Vegetação Brasileira, que a divide em 5 fases. A primeira fase é descrita como o reinício do processo de formação do horizonte orgânico do solo, através de sua colonização por herbáceas pioneiras, de famílias primitivas.

A segunda fase, que não é obrigatoriamente precedida pela primeira a depender do estado do solo, é denominada popularmente de “capoeirinha” e apresenta herbáceas gramínoides e plantas lenhosas. A terceira fase, é conhecida como “capoeira rala”, dominada por arbustos, mas com plantas de médio porte, que podem atingir até três metros de altura e apresentam poucas caméfitas.

A quarta fase recebe o nome de "capoeira propriamente dita", possui vegetação complexa que pode atingir até cinco metros de altura. A quinta e última fase de sucessão natural, o "capoeirão", é dominado por árvores com mais de 15 metros, desconsidera plantas emergentes e possui indivíduos do clímax circundante (IBGE, 2012a).

## **2.4 ÁREA DE ESTUDO**

Este trabalho tem o Parque Nacional das Araucárias (PNA) como área de estudo, o qual tem sua extensão compartilhada entre os municípios de Passos Maia e Ponte Serrada, ambos em Santa Catarina.

De acordo com o seu plano de manejo, a fitofisionomia predominante é de Floresta Ombrófila Mista, abrigando algumas espécies ameaçadas e protegidas, como o lobo-guará (*Chrysocyon brachyurus*), o pica-pau-de-cara-amarela (*Dryocopus galeatus*), o gato-maracajá

(*Leopardus pardalis mitis*) e a onça-parda (*Puma concolor capricornensis*). Da perspectiva hídrica, o parque está contido na bacia hidrográfica do Rio Uruguai (MMA; ICMBIO, 2010).

Na redação do seu plano de manejo, é descrito que o levantamento em campo para o uso do solo na área do parque foi elaborado no final de 2008 e publicado em 2009. Foram identificadas floresta em estágio secundário inicial de sucessão, floresta em estágio secundário médio de sucessão, floresta em estágio secundário avançado de sucessão, floresta primária pouco explorada, solo exposto, áreas de reflorestamento com espécies exóticas e áreas com pastagem/agricultura, as quais têm suas dimensões expostas na Tabela 1 e também pode ter sua delimitação observada através da Figura 11, presente na seção 3.4 deste trabalho (MMA; ICMBIO, 2010).

Tabela 1 - Uso do solo na área do PNA, de acordo com o estágio sucessional da floresta, áreas de reflorestamento e de pastagens/agricultura e solo exposto.

<b>Classes</b>	<b>Área no PNA (ha)</b>	<b>% no PNA</b>
Floresta em estágio secundário inicial de sucessão	1.103,258	8,60
Floresta em estágio secundário médio de sucessão	4.752,200	37,0
Floresta em estágio secundário avançado de sucessão	4.365,919	34,0
Floresta primária pouco explorada	1.445,850	11,26
Solo exposto	84,83	0,67
Áreas de reflorestamento com espécies exóticas	123,07	0,95
Áreas com pastagem/agricultura	965,874	7,52
<b>TOTAL</b>	<b>12.841,00</b>	<b>100</b>

Fonte: Plano de Manejo do Parque Nacional das Araucárias (MMA, ICMBio, 2010)

## 2.5 SENSORIAMENTO REMOTO E ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

A técnica de obtenção de informações a respeito de uma área, quando feito à distância é denominada de Sensoriamento Remoto. A tecnologia empregada geralmente envolve o uso de satélites ou veículos que permitam a captura de imagens aéreas. Os produtos desta atividade são dados em diversos formatos, usando comprimentos de onda do espectro eletromagnético, que podem ser representados através da geração de imagens (SOUZA et al., 2007).

O sensoriamento remoto é uma técnica consolidada para a avaliação dos estágios sucessionais, conforme consta no próprio Manual Técnico da Vegetação Brasileira. Neste

documento, são indicadas formas através das quais se distinguem os diferentes serais da Mata Atlântica, a partir da análise de imagens geradas em diferentes escalas.

Sobre as cinco fases descritas no manual elaborado pelo IBGE, as quais são abordadas no tópico 2.3.2 deste trabalho, a terceira pode ser reconhecida através da análise de fotografias aéreas pancromáticas ou infravermelhas, para escalas maiores do que 1:25.000. Para a quarta fase, os padrões da vegetação podem ser identificados ao se analisar nuances na cor cinza em escalas de 1:100.000 ou maiores. Na quinta e última fase, são necessárias imagens com detalhamento superior a 1:50.000 de modo a se poder diferenciar este tipo de vegetação, da floresta primária (IBGE, 2012a).

No que se trata da aplicação e escolha entre as imagens digitais geradas por satélites, diversos fatores são levados em consideração. O filtro inicial é o tipo de sensor utilizado, a partir dele é feita a triagem sobre a qualidade dos dados, nebulosidade, localização e periodicidade das aquisições (SOUZA et al., 2007).

Dentre as características que constituem e diferenciam os sensores utilizadas na obtenção de imagens para a análise da vegetação, destaca-se a resolução espacial. Definida pelo tamanho da menor área que pode ser representada em cada *pixel*, e ela é gerada a partir da captação pancromática ou multiespectral.

A resolução espectral refere-se à capacidade do sensor registrar informações de diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético em diferentes imagens. A resolução radiométrica trata da capacidade de diferenciação e armazenamento de valores de número digital, radiância, reflectância, etc nos *pixels* de uma imagem. A resolução temporal se refere à periodicidade de captação de imagens para uma mesma área. Por fim, a localização dos satélites, determinada pela sua altitude, influencia na faixa de imageamento (SOUZA et al., 2007).

A partir das informações acumuladas através do sensoriamento remoto, elabora-se a base de dados a ser manipulada de modo a se obter diversos índices relacionados à vegetação, de forma qualitativa e quantitativa, os quais são usados para monitorar aspectos como saúde e densidade da vegetação, com finalidades voltadas para a agricultura e conservação ecológica (RAEVA; ŠEDINA; DLESK, 2019). Em 1974, o conceito do NDVI é introduzido, a partir da exploração de análises espectrais de parâmetros derivados do sensor *Multispectral Scanner System* (MSS), Sistema de Escaneamento Multiespectral, do satélite *Earth Resources Technology Satellite* (ERTS) (ROUSE; HAAS; DEERING, 1974), o primeiro da série LANDSAT (GODDARD SPACE FLIGHT CENTER, [s.d.]).

Este índice considera a escala do espectro eletromagnético que parte do infravermelho próximo, do inglês *Near-Infrared* (NIR) e tange a luz visível, observa-se a absorção por pigmentos da estrutura foliar. Assim, este índice é amplamente utilizado para determinar diversos parâmetros biofísicos da vegetação, como a biomassa, vigor, estágio de crescimento, atividade fotossintética e cobertura vegetal (SOUZA FILHO et al., 2008).

O NDVI é um dos índices mais relevantes e utilizados, mas há também diversos outros com uso bem difundido, como o Índice de Clorofila Verde (GCI), utilizado para estimar clorofila. Outros exemplos são o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada Verde (GNDVI), Índice de Vegetação da Diferença Normalizada Vermelha (RNDVI) e o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) (ZERAFA, 2023) (USGS, 2018).

Especificamente tratando dos índices relevantes para a elaboração deste trabalho, além do NDVI, existem alguns outros que além de sua relevância individual e saúde da vegetação, também podem ser relacionados com aspectos abordados pelo CONAMA, como a densidade e a cobertura pelo dossel.

O índice EVI consiste em uma variação do NDVI, que oferece maior sensibilidade em áreas densas, além de lidar com distúrbios atmosféricos e a saturação de áreas muito verdes (TEIXEIRA et al., 2019).

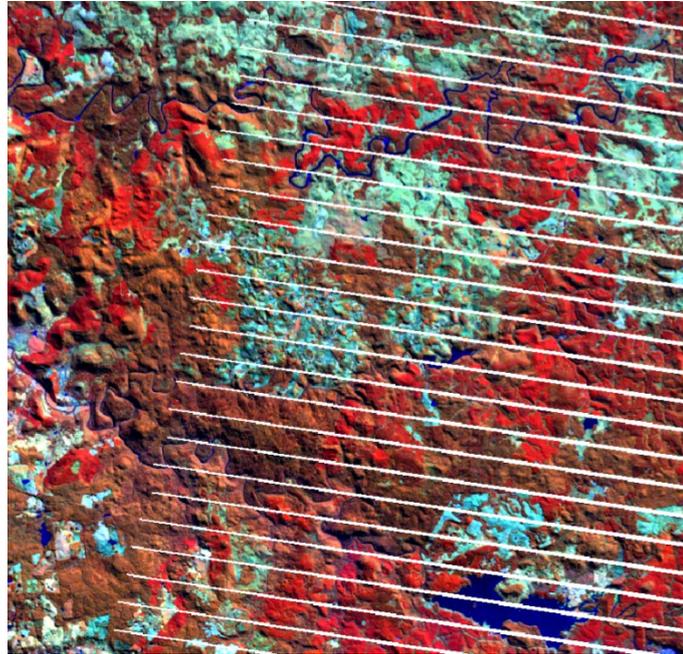
Outro índice utilizado é o NDMI, utilizado para estimar a umidade do solo e da vegetação, assim como o Índice Resistente à Atmosfera na Região Visível (VARI) que se baseia na variabilidade de vigor e estresse da planta e também o Índice de Diferença de Vegetação (DVI), utilizado para diferenciar o solo e a planta (TEIXEIRA et al., 2019; GITELSON et al., 2002; ZERAFA, 2023).

### **2.5.1 Operação e coleções de imagens da série LANDSAT**

O LANDSAT-7 foi lançado em abril de 1999 e segue operante. O satélite, LANDSAT-8 seguinte foi lançado em fevereiro de 2013, com sensores aprimorados em relação à versão anterior e também segue em operação.

Em maio de 2003 o sensor de varredura do sétimo satélite da série apresentou uma falha irreversível, comprometendo a geração de imagens contínuas e sem lacunas, como pode ser observado na Figura 5. Tais lacunas se devem à não possibilidade de recuperação do Corretor da Linha de Escaneamento (SLC), que compensava o deslocamento do satélite, nos dados extraídos durante a varredura. Ainda é possível acessar e utilizar este satélite como fonte para diversos fins, mas tais lacunas não podem ser superadas (USGS, 2024).

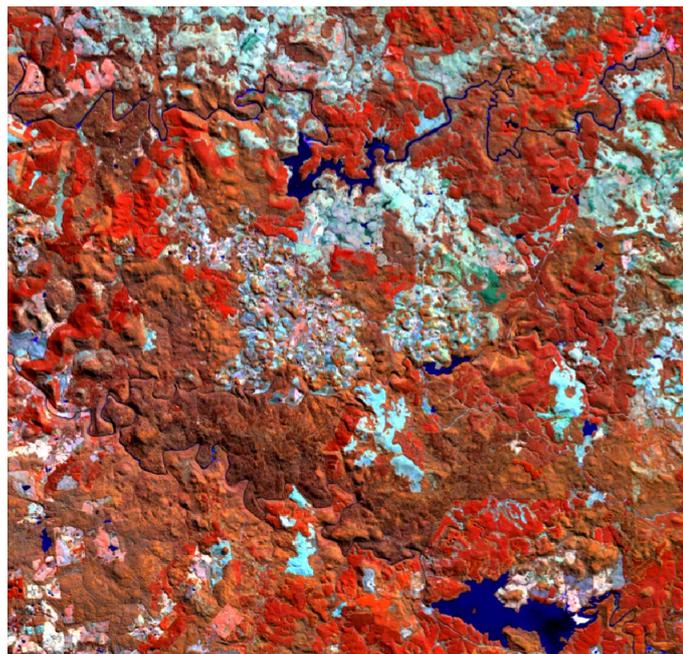
Figura 5 - Imagem multi-bandas gerada pelo LANDSAT 7 em 2008.



Fonte: Autoria própria, através da plataforma Google Earth Explorer, a partir da coleção de imagens cedida em uma cortesia do U.S. Geological Survey (2024)

Os dados gerados pelo LANDSAT-8 não contam com estas falhas, como é apresentada na Figura 6, também elaborada sobre a área de estudo do presente trabalho.

Figura 6 - Imagem multi-bandas gerada pelo LANDSAT 8 em 2013.



Fonte: Autoria própria, através da plataforma Google Earth Explorer, a partir da coleção de imagens cedida em uma cortesia do U.S. Geological Survey (2024)

As figuras apresentadas foram construídas com a utilização simultânea de mais de uma banda. No LANDSAT-8, cada uma das bandas é proveniente de um sensor próprio e recebe uma numeração crescente de acordo com o seu comprimento de onda e cor em inglês. Também é utilizada a terminologia SR para se referir às bandas, que vem do inglês *surface reflectance*, ou seja, reflectância de superfície.

Nele, o sensor responsável pela banda Blue, a segunda do satélite, capta ondas que vão de  $0,452\mu\text{m}$  até  $0,512\mu\text{m}$  e recebe o nome de SR\_2. O sensor responsável pela banda Green, a terceira do satélite, capta ondas que vão de  $0,533\mu\text{m}$  até  $0,590\mu\text{m}$  e recebe o nome de SR\_3. O sensor responsável pela banda Red, a quarta do satélite, capta ondas que vão de  $0,636\mu\text{m}$  até  $0,673\mu\text{m}$  e recebe o nome de SR\_4. O sensor responsável pela banda NIR, a quinta do satélite, capta ondas que vão de  $0,851\mu\text{m}$  até  $0,879\mu\text{m}$  e recebe o nome de SR\_5. O sensor responsável pela banda SWIR-1, a sexta do satélite, capta ondas que vão de  $1,566\mu\text{m}$  até  $1,651\mu\text{m}$  e recebe o nome de SR\_6 (USGS, 2018).

## 2.6 LÓGICA FUZZY E SUAS APLICAÇÕES

A lógica fuzzy é derivada de conjuntos fuzzy, uma teoria introduzida pelo Dr. Lotfi A. Zadeh, em 1965. Tais conjuntos se baseiam em classes nas quais o pertencimento dos objetos é estabelecido em um grau contínuo. Desta forma, não se atribui a um objeto um pertencimento binário e inflexível, como ocorre em conjuntos tradicionais, mas, sim, através de funções de pertinência (ZADEH, 1965).

O termo fuzzy, de origem anglófona, foi conservado em detrimento da adoção de tradução e remete a incerteza, imprecisão, subjetividade e caráter prolixo ou difuso (BARROS; BASSANEZI, 2010). Sua denominação reflete de maneira adequada a estrutura conceitual associada a ela para processar problemas dotados de imprecisão, devido à ausência de critérios claros para a classificação de objetos (ZADEH, 1965).

Os conjuntos fuzzy são adequados para reconhecer padrões e processar informações, atividades as quais frequentemente exigem ponderações humanas em sua análise (ZADEH, 1965). Esta teoria foi elaborada visando construir um modelo matemático que assimile inclusive subjetividades linguísticas de alguns termos como, “variável”, “significativa” e “muito grande”.

Assim, ela pode ser considerada como um marco na delimitação de cálculos computacionais sobre dados de entrada imprecisos (BARROS; BASSANEZI, 2010).

Conjuntos fuzzy são compostos por funções de pertinência, as quais graduam cada objeto em uma escala não binária. Uma função  $f_A(x)$  indica o grau de pertinência de um elemento  $x$  em um conjunto fuzzy A, variando de 0 (não membro) até 1 (membro do qual a representação é completa). A seguir, são descritas algumas das funções básicas que definem o conceito e contribuem para o seu entendimento (ZADEH, 1965).

A união de dois conjuntos fuzzy A e B, é um outro conjunto fuzzy C, com a função de pertinência representada através da Equação (1).

$$f_C(x) = \max(f_A(x), f_B(x))$$

(1)

A intersecção de dois conjuntos fuzzy A e B segue uma lógica similar, da função de pertinência, como pode ser observado na Equação (2).

$$f_C(x) = \min(f_A(x), f_B(x))$$

(2)

O complemento de um conjunto fuzzy A é determinada por  $A'$ , como se observa na função representada pela Equação (3).

$$f_{A'}(x) = 1 - f_A(x)$$

(3)

Um conjunto fuzzy A está contido em um conjunto fuzzy B quando para todos os objetos do conjunto universo, o grau de pertinência em B for maior do que em A, conforme consta na Equação (4).

$$f_A(x) \leq 1 - f_B(x).$$

(4)

O grau de separação D avalia quão separados estão dois conjuntos fuzzy em um determinado conjunto universo, levando da perspectiva de um valor M, atribuído pelo menor valor de pertinência dos dois conjuntos em relação a uma fronteira teórica que separa os conjuntos, tal qual se apresenta na Equação (5).

$$D = 1 - M$$

(5)

### 2.6.1 Lógica fuzzy

Conceitos da lógica tradicional, a qual é associada a conjuntos tradicionais, apresentam limitações para sua aplicação em sistemas complexos. Em problemas nos quais o grau de incerteza torna problemática a obtenção de respostas diretas e binárias, faz-se necessária a aplicação de outras abordagens, como lógicas multivaloradas e infinitamente-valoradas (KLIR; YUAN, 1995).

Na lógica fuzzy, proposições simples podem ser classificadas a partir de dois critérios, sendo condicionais ou incondicionais e se são qualificadas ou não qualificadas. A partir destas proposições, estabelecem-se quatro cenários, ou seja, quatro conjuntos fuzzy (KLIR; YUAN, 1995).

No que se trata do reconhecimento de padrões, além de fronteiras mal definidas, são reconhecidos três problemas como os principais para o reconhecimento de padrões. Estes problemas estão relacionados à representação dos dados de entrada obtidos, à extração de características dos dados de entrada e à escolha pelo processo decisório mais adequado.

Há algumas metodologias dentro da lógica fuzzy para se encarar o reconhecimento de padrões e superar tais impasses, dentre elas temos o *Fuzzy Membership-Roster Methods* e o *Fuzzy Syntactic Method*.

### 2.6.2 Aplicações relacionadas

O processamento de imagens se configura como uma aplicação consolidada da lógica fuzzy para o reconhecimento de padrões (MÉNDEZ, 2015).

Discute-se a aplicação da lógica fuzzy em contextos de processamento de imagens, considerando-a eficaz para lidar com dados visuais complexos. Também, é necessário introduzir o conceito de filtragem de imagens a partir desta lógica, para a remoção de ruídos, suavização de ruídos gaussianos, enquanto preserva os aspectos da imagem como um todo. O processamento dos *pixels* se torna mais assertivo se realizado de maneira individualizada, um tratamento facilitado pela lógica fuzzy (MENHAJ; BAGHER, 2000).

A respeito de imagens provenientes do sensoriamento remoto, sua discriminação pode ser abordada da perspectiva multiespectral. É destacado o benefício no refinamento dos resultados ao se classificar *pixels* considerando também sua correlação espectral com a vizinhança e informações que dizem respeito a sua textura. Contudo, tal processamento é lento e poderia ser otimizado se associado à outras ferramentas, como a transformação Wavelet (MEHER; SHANKAR; GHOSH, 2007).

### 2.6.3 Instrumentos da lógica fuzzy

Os instrumentos das funções de pertinência da lógica fuzzy são responsáveis por determinar a pertinência de um objeto a um conjunto. A partir de funções condicionais e de qualificações, é possível elaborar um sistema para processar informações e reconhecer padrões, até mesmo diante de fronteiras mal definidas.

Dentre os principais métodos para realizar tal qualificação, tem-se o método centróide. Nele, calcula-se a massa da área sob a curva da função de pertinência para o objeto, retornando um valor preciso. Este valor é referenciado na lógica como *crisp*, pode ir de zero a um, de modo que quanto maior o seu valor, maior o grau de pertencimento do objeto ao conjunto. Tal procedimento é elaborado a partir da Equação (6) (LIMA, 2015).

$$Centroide = \frac{\sum_{n=1}^k \mu_n \times C_n}{\sum_{n=1}^k \mu_n} \quad (6)$$

Onde:

$\mu$ : grau de pertinência

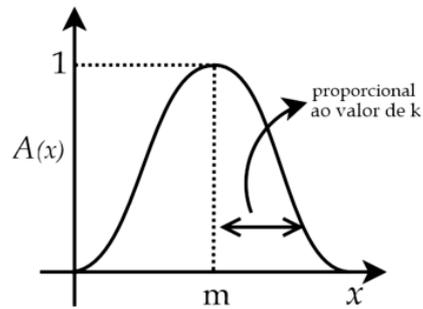
$C_n$ : valor do centróide do n-ésimo conjunto fuzzy

$k$ : é o número de conjuntos fuzzy a qual o elemento pertence

Paralelamente aos conjuntos, existem algumas funções para defini-los. O primeiro tipo abordado se trata do modelo gaussiano, representado pela Equação (7) e retornado uma curva tal qual a Figura 7 (LIMA, 2015).

$$f_{(A)} = e^{-k \times (x-m)^2} \quad (7)$$

Figura 7 - Representação de uma função de pertinência gaussiana.



Fonte: Reprodução de Lima (2015)

Onde:

$A$ : conjunto fuzzy;

$m$ : parâmetro da função;

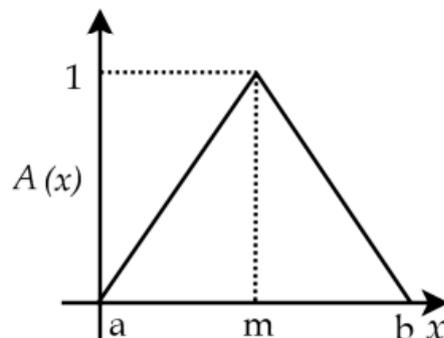
$k$ : parâmetro da função, em que  $k > 0$ .

O segundo tipo abordado é a função triangular, representada pela Equação (8), retorna uma curva tal qual a Figura 8 (LIMA, 2015).

$$\begin{cases} \cdot 0 \text{ se } x \leq a \\ \cdot \frac{x - a}{m - a} \text{ se } x \in (a, m) \\ \cdot 1 \text{ se } x = m \\ \cdot \frac{b - x}{b - m} \text{ se } x \in (m, b) \\ \cdot 0 \text{ se } x \geq b \end{cases}$$

(8)

Figura 8 - Representação de uma função de pertinência triangular.



Fonte: Reprodução de Lima (2015)

Onde:

- A*: conjunto fuzzy;
- m*: parâmetro da função;
- a*: parâmetro da função, em que  $a \leq 0$ ;
- b*: parâmetro da função, em que  $b \geq 0$ .

## 2.7 ESTUDOS RELACIONADOS

Dentre os artigos que motivaram a elaboração deste trabalho, o “*Computer-aided classification of successional stage in subtropical Atlantic Forest: a proposal based on fuzzy artificial intelligence*”, aborda o sistema de interferência fuzzy e técnicas de inteligência artificial para se efetuar a classificação de estágios sucessionais (BRESSANE et al., 2023).

O estudo tem como base de dados a leitura de campo em 177 áreas amostrais da Mata Atlântica catarinense, direcionada pelos parâmetros estabelecidos na resolução do CONAMA para a região. Nos locais onde a fitofisionomia era de Floresta Ombrófila Mista, comparou-se o desempenho de diversos algoritmos de aprendizado de máquina. Aquele baseado na lógica fuzzy apresentou a maior taxa de acerto dentre os demais, atingindo 98,3% de acerto no confronto com a classificação elaborada por técnicos em visitas a campo.

Outro artigo relevante para esta matéria é denominado “Análise de classificadores de estágios sucessionais em um fragmento de Mata Atlântica”. Nele, explora-se o uso de sensoriamento remoto para a identificação e classificação dos serais da Mata Atlântica (TEIXEIRA et al., 2019).

A base de dados para o estudo é composta de alguns índices de vegetação, como NDVI, EVI e NDMI, gerados pelos satélites da série LANDSAT TM. O tratamento dos dados foi feito através da Análise Discriminante Quadrática e comparado a associações diretas entre os índices e os estágios sucessionais atribuídos por técnicos às áreas de interesse.

Como resultado, constatou-se uma taxa de acerto da análise multivariada de 92% enquanto a associação direta não atingiu a margem de 70%. Além disso, o artigo frisa que é crucial levar em consideração a sazonalidade da obtenção dos dados, uma vez que os biomas apresentam padrões de reflectância variado ao longo do ano.

Mais um artigo que tange o escopo do presente trabalho é o “*Relationships between forest structure and vegetation indices in Atlantic Rainforest*”. Nele são exploradas técnicas de sensoriamento remoto e índices biofísicos para monitorar fragmentos florestais da Mata

Atlântica como instrumentos de diagnóstico, e não apenas quantificação (FREITAS; MELLO; CRUZ, 2005).

Sua base de dados também parte de índices provenientes do levantamento feito por satélites da série LANDSAT. Como resultado, o estudo indica quais índices apresentam melhor desempenho a partir das características fitoecológicas às quais ele é associado.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

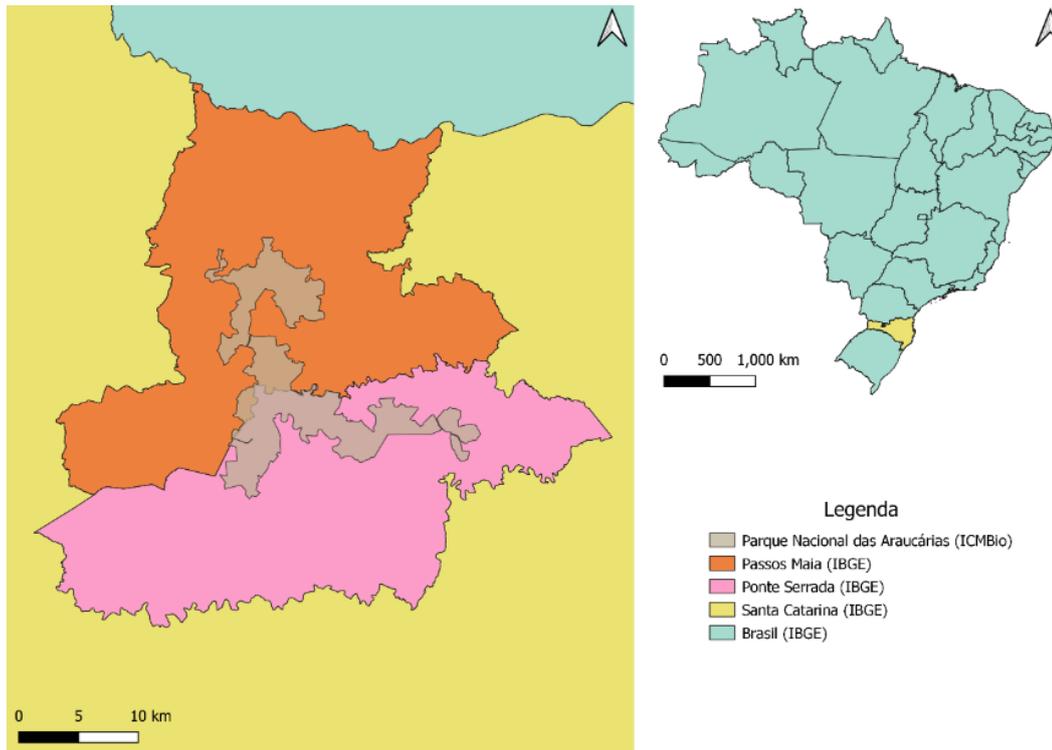
#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo desta pesquisa foi o Parque Nacional das Araucárias. Sua extensão é dividida entre os municípios de Passos Maia e Ponte Serrada, em Santa Catarina. Esta unidade de conservação integra o bioma da Mata Atlântica, com uma área de 12.809,59 hectares. O parque foi criado em outubro de 2005 através de um decreto, e é gerido pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), tendo seu conselho consultivo instaurado em 2010 com a promulgação do seu Plano de Manejo (MMA; ICMBIO, 2010).

O município de Passos Maia conta com uma população total de 4.034 habitantes (IBGE, 2022), da qual 75% reside em área não urbanizada (IBGE, 2012b). Sua extensão total é de quase 62.000 hectares, sendo que 5.761,49 deles são compostos pelo Parque Nacional das Araucárias (MMA; ICMBIO, 2010).

Por sua vez, em Ponte Serrada, que abriga a porção sul do parque, a população total é de 10.649 habitantes (IBGE, 2022). Como a proporção de residentes em áreas rurais é menor, 31% (IBGE, 2012b), o número absoluto se assemelha ao outro município. Sua extensão total também é compatível, com cerca de 56.000 hectares, dos quais 6.965,08 são compostos pelo Parque Nacional. Assim, este município abriga 54,73% da área do parque, enquanto o outro, os 45,27% restantes (MMA; ICMBIO, 2010). Na Figura 9, é possível observar os limites do parque dividido entre os dois municípios da Região Geográfica Imediata de Xanxerê.

Figura 9 - Limite territorial do Parque Nacional das Araucárias



Fonte: Autoria própria (2024)

### 3.2 IMAGENS UTILIZADAS

A base de dados foi obtida a partir de imagens geradas pelos sensores da série LANDSAT, disponibilizados pela *United States Geological Survey* (USGS). A série temporal utilizada provém das imagens geradas pelo LANDSAT-8 no período que compreende o inverno de 2013, que se deu entre os dias 21 de junho e 22 de setembro.

Uma vez que os índices escolhidos foram NDVI, EVI, NDMI, VARI e DVI, para a elaboração dos seus cálculos, foram necessários dados referentes às bandas usualmente denominadas de Azul, Verde, Vermelho, NIR e SWIR-1. Estes parâmetros são destacados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resolução espectral das bandas do satélite LANDSAT-8

Bandas	Cor	Comprimento de Onda	
		início	término
-	-	início	término
SR_2	Azul	0,452 $\mu$ m	0,512 $\mu$ m
SR_3	Verde	0,533 $\mu$ m	0,590 $\mu$ m
SR_4	Vermelho	0,636 $\mu$ m	0,673 $\mu$ m

Bandas	Cor	Comprimento de Onda	
		início	término
-	-	0,851 $\mu\text{m}$	0,879 $\mu\text{m}$
SR_5	NIR	1,566 $\mu\text{m}$	1,651 $\mu\text{m}$
SR_6	SWIR-1		

Fonte: Adaptado do U.S. Geological Survey (2024)

Estes dados são organizados e disponibilizados através da plataforma Google Earth Engine, administrada pela Google. Esta fonte foi a escolhida para a elaboração deste trabalho por permitir sua manipulação através da linguagem JavaScript antes mesmo da sua coleta.

### 3.3 AQUISIÇÃO DAS IMAGENS ATRAVÉS DO GOOGLE EARTH ENGINE

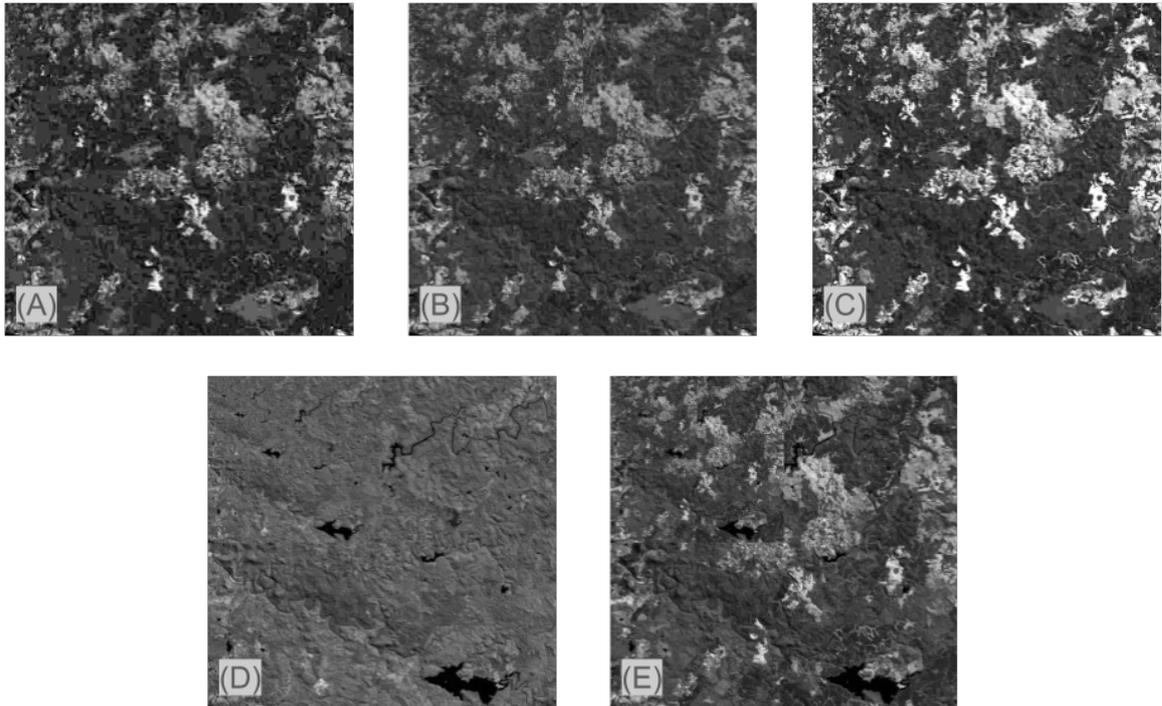
Os dados foram extraídos da plataforma Google Earth Engine, a partir da elaboração de um código em JavaScript. Neste código, foi definida uma geometria retangular que compreendesse a extensão do Parque Nacional das Araucárias, a partir de coordenadas que representam os vértices deste retângulo. Esta geometria é utilizada no código para recortar a imagem gerada pelo satélite.

Foi carregada a coleção de imagens provenientes do satélite LANDSAT-8, segmentadas pelo *level 2 collection 2 tier 1*, por terem a melhor qualidade da série e contar com a correção atmosférica aplicada (USGS, 2018).

Nesta seção, foi definido o período selecionado para o polígono delimitado. Também foi indicada a prioridade por imagens com a menor cobertura de nuvens e aplicados alguns fatores de conversão para a correção de escala e brilho.

Por fim, o código exportou uma imagem para cada banda no formato GeoTIFF, respeitando a escala de definição característica, já no sistema de referência de coordenadas adequado à área de estudo, o EPSG:31982 – SIRGAS 2000 / UTM zone 22S. As imagens podem ser observadas na Figura 10.

Figura 10 - Imagens obtidas do Parque Nacional das Araucárias.



Legenda: (A) Imagem adquirida para a área de estudo a partir da banda SR\_2; (B) Imagem gerada para a área de estudo a partir da banda SR\_3; (C) Imagem gerada para a área de estudo a partir da banda SR\_4; (D) Imagem gerada para a área de estudo a partir da banda SR\_5; (E) Imagem gerada para a área de estudo a partir da banda SR\_6.

Fonte: Autoria própria, através da plataforma Google Earth Explorer, a partir da coleção de imagens cedida em uma cortesia do U.S. Geological Survey (2024)

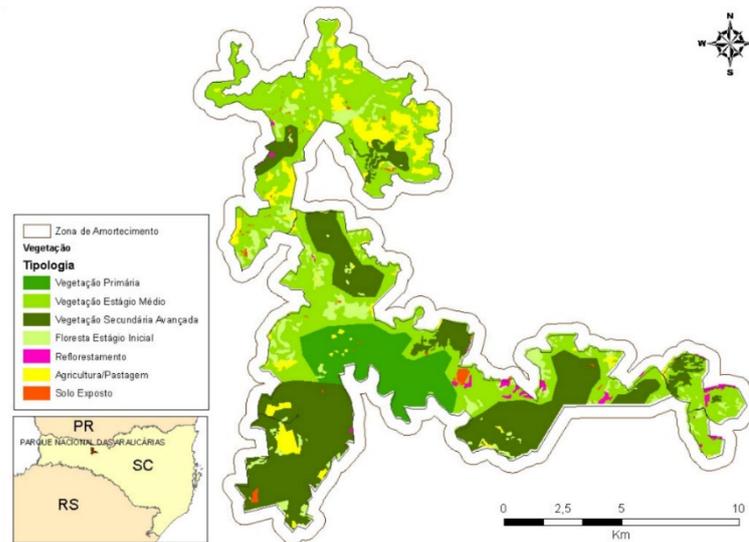
A partir da geração destas imagens de banda única, elas passaram a ser manipuladas em Sistema de Informações Geográficas (SIG).

### 3.4 MANIPULAÇÃO DAS IMAGENS NO QGIS

O software selecionado para a manipulação das imagens geradas foi o QGIS. No arquivo base, foi adotado o sistema de coordenadas EPSG:31982 – SIRGAS 2000 / UTM zone 22S. Então, a partir de dois shapes disponibilizados pelo IBGE, fez-se a reprojeção sob o sistema de coordenadas adotado e extraiu-se os limites municipais e as unidades federativas.

Foi reprojetoado o shapefile dos limites do Parque Nacional das Araucárias disponibilizado no portal do Instituto Socioambiental (ISA). Então, o mapa de uso do solo do plano de manejo do parque, apresentado na Figura 11 foi georreferenciado.

Figura 11 - Reprodução do mapa de uso do solo do PNA, de acordo com o estágio sucessional da floresta, áreas de reflorestamento e de pastagens/agricultura e solo exposto



Fonte: Plano de Manejo do Parque Nacional das Araucárias (MMA, ICMBio, 2010).

A partir da Figura 11, foram elaborados novos *shapefiles*, para extrair através de seus polígonos, os dados de cada tipologia e, a partir destes foi feito o recorte dos *rasters* obtidos para cada uma das bandas. A partir destes arquivos, os pixels além de georreferenciados, também se tornam categorizados e prontos para serem processados em um software mais adequado.

### 3.5 SCRIPTS PARA O PROCESSAMENTO DOS DADOS

Para manipular as informações obtidas, foi escolhida a linguagem de programação Python, por ser de alto nível e eficiente diante da finalidade de manipular e analisar grandes volumes de dados (BORGES, 2014). O principal ambiente de desenvolvimento integrado, *Integrated Development Environment* (IDE) utilizado foi o software Spyder, com eventuais execuções na plataforma Colab, da Google.

#### 3.5.1 Estruturação dos dados

Dentro do script, os arquivos foram localizados através de loops iterativos entre os diretórios para os quais eles haviam sido exportados com o uso da biblioteca *os* para importar

arquivos com a extensão *.tiff*. Através das bibliotecas *rasterio* e *numpy*, obteve-se os metadados, valores, coordenadas, sistema de coordenadas utilizado e os valores incutidos no *raster*.

A partir da categorização dos dados extraídos dos arquivos *raster* e com o uso da biblioteca *pandas*, foram elaborados cinco *dataframes*, um para cada banda reflectiva, com os valores de todas as tipologias. Por fim, os *dataframes* gerados foram exportados como arquivos CSV.

### 3.5.2 Cálculo dos índices de vegetação

Para a elaboração da seção do script responsável por realizar as operações matemáticas que calculam os índices de vegetação reflectância vegetativa, foi gerado um dicionário com os *dataframes* referentes aos arquivos CSV gerados na seção 3.5.1. Então puderam ser programadas as equações para cada índice.

O índice NDVI se baseia na Equação (9) de Teixeira et. al., (2019) e de Zerafa, (2023), que pode ser escrita pela perspectiva das bandas correspondentes.

$$NDVI = \frac{(SR_5 - SR_4)}{(SR_5 + SR_4)} \quad (9)$$

Onde:

*NDVI*: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada;

*SR<sub>4</sub>*: Banda do vermelho do sensor de superfície;

*SR<sub>5</sub>*: Banda do infravermelho próximo, do sensor de superfície.

O índice EVI se baseia na Equação (10) de Teixeira et. al., (2019), que pode ser escrita pela perspectiva das bandas correspondentes.

$$EVI = 2,5 \times \frac{(SR_5 - SR_4)}{(SR_5 + (6 \times SR_4) - (7,5 \times SR_2) + 1)} \quad (10)$$

Onde:

*EVI*: Índice de Vegetação Realçado;

*SR<sub>2</sub>*: Banda azul do sensor de superfície;

*SR<sub>4</sub>*: Banda vermelha do sensor de superfície;

$SR_5$ : Banda do infravermelho próximo, do sensor de superfície.

O índice NDMI se baseia na Equação (11) de Teixeira et. al., (2019) e pode ser escrita pela perspectiva das bandas correspondentes.

$$NDMI = \frac{(SR_5 - SR_6)}{(SR_5 + SR_6)} \quad (11)$$

Onde:

$NDMI$ : Índice de Vegetação da Diferença Normalizada por Umidade;

$SR_5$ : Banda do infravermelho próximo, do sensor de superfície;

$SR_6$ : Banda do infravermelho de onda curta do sensor de superfície.

O índice VARI se baseia na Equação (12) de Gitelson et al., (2002) e de Zerafa, (2023), que pode ser escrita pela perspectiva das bandas correspondentes.

$$VARI = \frac{(SR_3 - SR_4)}{(SR_3 + SR_4 - SR_2)} \quad (12)$$

Onde:

$VARI$ : Índice Resistente à Atmosfera na Região Visível;

$SR_2$ : Banda azul do sensor de superfície;

$SR_3$ : Banda verde do sensor de superfície;

$SR_4$ : Banda vermelha do sensor de superfície.

O índice DVI se baseia na Equação (13) de Zerafa, (2023) e pode ser escrita pela perspectiva das bandas correspondentes.

$$DVI = (SR_5 - SR_4) \quad (13)$$

Onde:

$DVI$ : Índice de Diferença de Vegetação;

$SR_4$ : Banda vermelha do sensor de superfície;

$SR_5$ : Banda do infravermelho próximo, do sensor de superfície.

Com o auxílio da biblioteca *pandas*, as equações foram aplicadas e um novo dicionário foi gerado, com um *dataframe* por índice calculado. Também foram exportados cinco novos arquivos CSV, correspondentes a cada índice.

Ao converter os *dataframes* em *geodataframes*, através da elaboração de uma função e com o auxílio das bibliotecas *shapely*, *GeoPandas* e *Matplotlib*, foi possível gerar mapas relativos a cada índice.

Dos índices, com o uso de funções nativas da biblioteca *numpy*, extraiu-se valores estatísticos de interesse, relativos a cada tipologia de área estudada. Foram calculados os valores para os mínimos, medianas, máximos, primeiro quartil (Q1) e o terceiro quartil (Q3). Por fim, foram calculados os valores do intervalo interquartil (IQR), o limite inferior e o limite superior, conforme consta nas Equações (19), (20) e (21).

$$IQR = Q3 - Q1 \quad (14)$$

$$Limite Inferior = Q1 - 1,5 \times IQR \quad (15)$$

$$Limite Superior = Q3 + 1,5 \times IQR \quad (16)$$

Onde:

*IQR*: Intervalo interquartil;

*Q1*: Primeiro quartil;

*Q3*: Terceiro quartil.

A partir dos valores obtidos, foi possível gerar os boxplots dos índices, com o uso da biblioteca *seaborn*. Além deles, também se tem os dados necessários para implementar a lógica fuzzy no script.

### 3.5.3 Implementação da lógica fuzzy

A biblioteca *scikit-fuzzy* foi utilizada para implementar a lógica fuzzy. Foram considerados os conjuntos de entrada, ou antecedentes, a partir dos índices vegetativos e parâmetros estatísticos calculados. Isto resultou em vinte conjuntos, tendo em vista que para cada um dos quatro tipos de áreas de interesse (Vegetação Primária e Secundária em estágio

inicial, médio e avançado de regeneração), foram atribuídos os valores de cada um dos cinco índices (NDVI, EVI, NDMI, VARI e DVI).

A biblioteca *scikit-fuzzy*, tendo em vista a sua sessão de controle (*ctrl*), classifica estes conjuntos como antecedentes, os declarando a partir de um arranjo elaborado pela biblioteca *numpy*.

Os conjuntos de saída, ou consequentes, são utilizados na etapa de interpretação final dos dados, ou *desfuzificação*. Eles foram declarados seguindo o mesmo padrão, mas com a utilização do operador adequado. Foram utilizados apenas quatro conjuntos consequentes, um para cada tipologia avaliada. A ferramenta aborda este procedimento aplicando o método centroide.

Foram utilizadas funções gaussianas e triangulares para definir os conjuntos de entrada, enquanto os conjuntos de saída contaram apenas com funções triangulares. Para a construção destas funções, foram utilizados os controladores *fuzz.gaussmf* e *fuzz.trimf*, ambas da biblioteca *scikit-fuzzy*.

As funções descendentes são do tipo triangular e foram geradas automaticamente pela ferramenta *automf* da biblioteca *scikit-fuzzy*.

A biblioteca exige a declaração de regras de decisão para poder operar sobre o sistema, a partir das quais se determina o pertencimento de cada conjunto descendente. Para tal, considerou-se os conjuntos antecedentes dos pixels e sua pertinência a partir das funções por tipologia. Como cada pixel é considerado sob a perspectiva de todos os índices para cada tipo de vegetação, e a pertinência ou não deste atributo foi avaliada como verdadeira ou falsa.

Atribuindo relevância igual aos índices de vegetação, pôde-se estabelecer uma lógica booleana para redigir as regras. Desta perspectiva, um píxel que possua valor de pertinência adequado para todos os índices se enquadraria no conjunto consequente mais elevado, no caso, o conjunto *A*. Conforme não ocorra tal pertinência, o conjunto consequente ao qual o píxel se atribui, decai do conjunto *B* até o conjunto *F*.

Com a utilização de cinco índices de vegetação, foram adotados seis conjuntos descendentes, conforme consta na Tabela 3.

Tabela 3 - Quantidade de presenças dos conjuntos

Quantidade de índices, cujos valores indicam a pertinência de um pixel ao seral da função	Quantidade de índices, cujos valores não indicam a pertinência de um pixel ao seral da função	Conjunto consequente
0	5	F
1	4	E
2	3	D
3	2	C
4	1	B
5	0	A

Fonte: Autoria própria (2024).

Tais regras foram declaradas através da ferramenta *ctrl.Rule*, da biblioteca *scikit-fuzzy*.

Então, foram declarados os controles do sistema de interferência fuzzy, contendo as regras definidas, com o uso da ferramenta *ctrl.ControlSystem*, da biblioteca *scikit-fuzzy*. Foi adotado um controlador por tipologia.

Finalmente, através da ferramenta *ctrl.ControlSystemSimulation*, da biblioteca *scikit-fuzzy*, os controladores foram acionados. O processo foi repetido para toda a base de dados quatro vezes, utilizando em cada uma delas, o controlador de uma tipologia diferente.

Tendo em vista o alto volume de dados, foi utilizada a biblioteca *joblib* para que as rotinas de simulações fossem executadas de maneira paralela.

### 3.5.4 Processamento para resultados finais

A partir dos valores obtidos, foi feita a comparação entre qual era o valor maior de pertinência, diante das diferentes simulações de tipologia para cada pixel, resultando no modelo final em forma de um *dataframe*. O *dataframe* foi filtrado por tipologia e foi gerado um arquivo CSV para cada, de modo que pudesse ser carregado novamente no QGis para a geração de imagens.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 BASE DE DADOS

Conforme discutido nos itens 2.4, 2.5.2 e 3.2, há uma questão envolvendo o cruzamento entre os dados levantados em campo na elaboração do mapa de uso do solo e a extração dos valores de bandas.

Diante da incompatibilidade entre a boa operação técnica do LANDSAT-7 e a data das aferições em campo feitas para a elaboração do Plano de Manejo

O segundo cenário, consistia em adotar imagens que precedem a falha técnica. Neste caso, a série temporal adotada seria de 2002, gerando um intervalo de possíveis intervenções antrópicas ou climatológicas de seis anos.

O terceiro cenário, consistia em adotar imagens geradas por um satélite lançado posteriormente. Neste caso, a série temporal adotada na, resultando em imagens sem falhas, mas com um intervalo de possíveis intervenções antrópicas ou climatológicas de cinco anos.

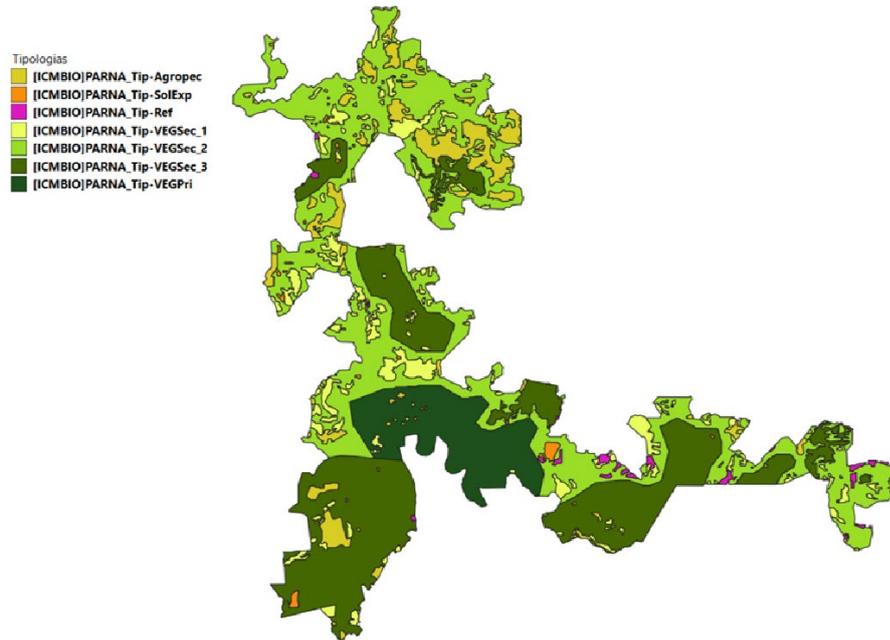
Todos os cenários descritos implicam em imprecisões no resultado, quer seja pela mudança da paisagem, ou pela escassez de informações que compõe a base de dados. Da ponderação, o segundo cenário foi descartado dado o entendimento que as possíveis mudanças de origem antrópica nele poderiam ser mais agressivas, tendo em vista que o Parque Nacional das Araucárias só foi criado através de um decreto no ano de 2005.

Diante do impasse entre o primeiro e o terceiro cenário e a impossibilidade técnica de se testar ambos os cenários, o terceiro foi escolhido por garantir uma base de dados contínua e o entendimento que a mudança da paisagem mais significativa fosse a própria sucessão ecológica, tendo em vista que o parque já contava com sua preservação garantida por meio de decreto.

### 4.2 MANIPULAÇÃO DE DADOS NO QGIS

Baseou-se na Figura 11, para gerar um mapa de uso do solo do Parque Nacional das Araucárias em formato *shape*, contendo os limites de tipologias definidos. A Figura 12 foi elaborada manualmente, de modo a conter um *shape* para cada um dos usos do solo levantados no Plano de Manejo.

Figura 12 - Mapa de tipologias extraídas do Plano de Manejo do Parque Nacional das Araucárias



Fonte: Aatoria própria (2024).

Tal arquivo foi importante para filtrar os *rasters* de cada banda, de modo a extrair as informações desejadas para a elaboração do modelo. Em sua construção, cada polígono foi criado individualmente, dado que o mapa de uso do solo apresentado na Figura 11 não é disponibilizado do mapa de uso do solo em formato aberto e digital, apenas através de uma figura. Desta forma, cria-se uma fonte de imprecisões e distorções, diante da dificuldade técnica em se projetar a figura dos limites de tipologias do parque

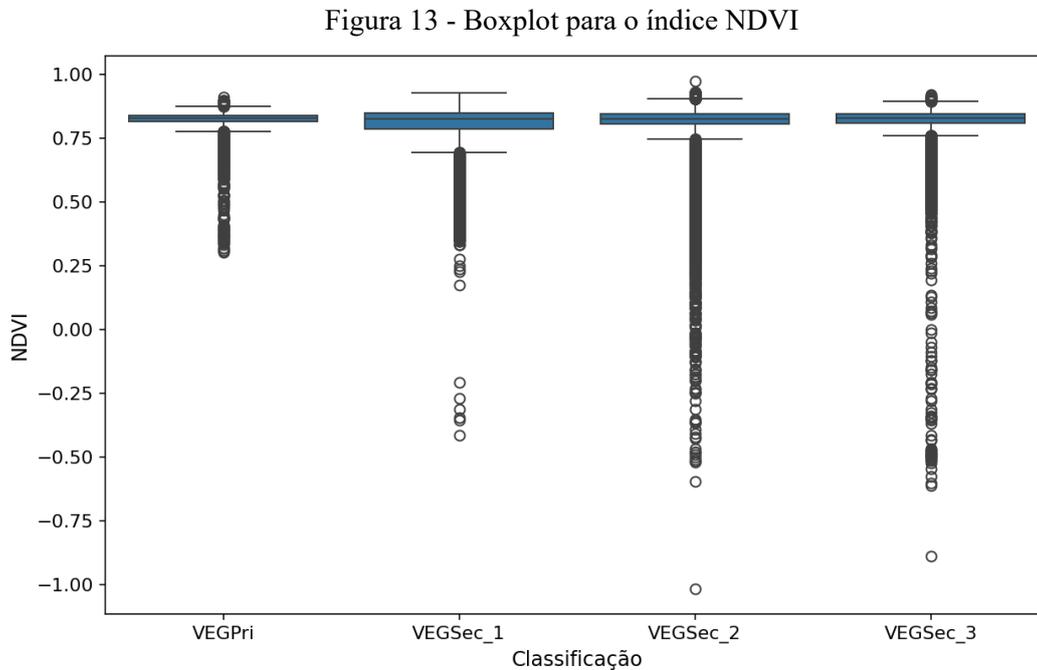
### 4.3 SCRIPTS PARA O PROCESSAMENTO DOS DADOS

#### 4.3.1 Cálculo dos índices de vegetação

Durante o cálculo dos índices de reflectância, foram gerados cinco gráficos do tipo boxplots, cada um referente a um índice e contendo as quatro tipologias avaliadas.

A Figura 13 contém os dados que representam o índice NDVI. Nele é possível observar que para todas as tipologias, há grande dispersão de outliers localizada limite inferior, enquanto há pouca sobre o limite superior. Diante da amplitude da escala, que varia de um negativo a um positivo, as caixas para todas elas possuem dimensões estreitas. Tal conformação indica uma distribuição concentrada no intervalo interquartil, resultando na baixa variabilidade dos dados,

que não se afastam muito da média para cada tipologia. Além disso, nota-se que elas se encontram em posições parelhas, o que indica uma simetria entre os grupos, com distribuições semelhantes.

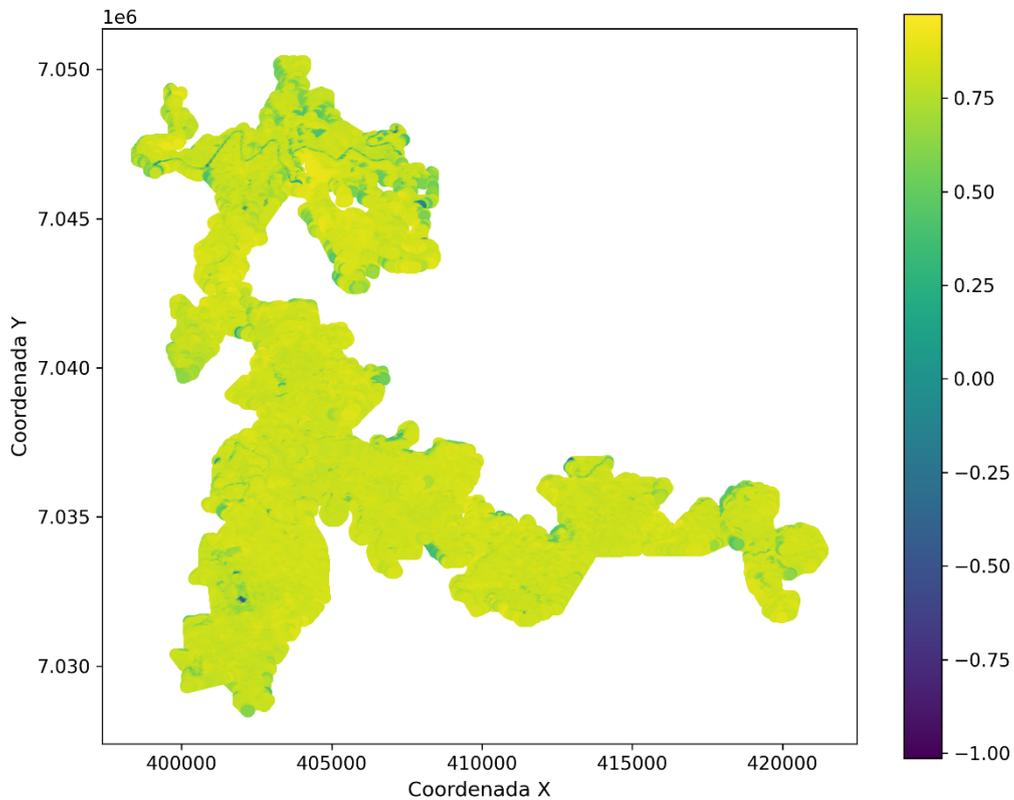


Legenda: (VEGPri) Vegetação primária; (VEGSec\_1) Vegetação secundária em estágio de sucessão inicial; (VEGSec\_2) Vegetação secundária em estágio de sucessão intermediário; (VEGSec\_3) Vegetação secundária em estágio de sucessão avançado.

Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 14 contém a interpretação visual dos dados calculados referente ao índice NDVI, plotado para toda a extensão do parque. Tal qual indicado no boxplot, há poucas nuances de variação para este índice quando a maior parte das que podem ser notadas, recaem sobre áreas de tipologias como agropecuária.

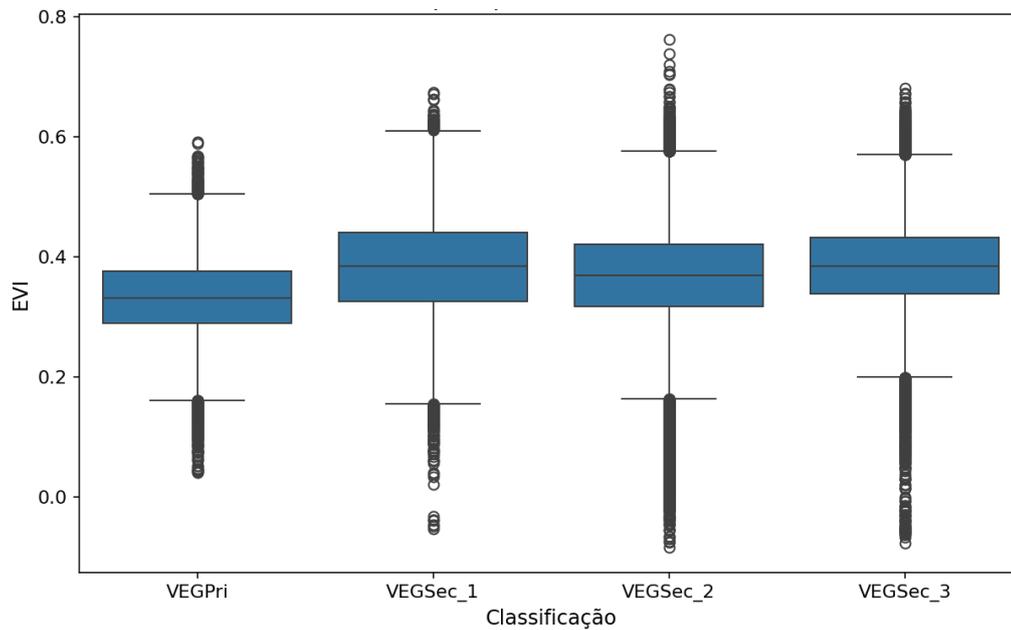
Figura 14 - Mapa do índice NDVI



Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 15 contém os dados que representam o índice EVI, para o qual nota-se um equilíbrio maior entre os outliers superiores e inferiores do que na Figura 13. Além da amplitude geral dos dados ser inferior, as caixas são maiores, mas ainda se apresentam de forma parelha, com um leve deslocamento superior para a vegetação secundária em estágio inicial, e um leve deslocamento inferior para a vegetação primária.

Figura 15 - Boxplot para o índice EVI

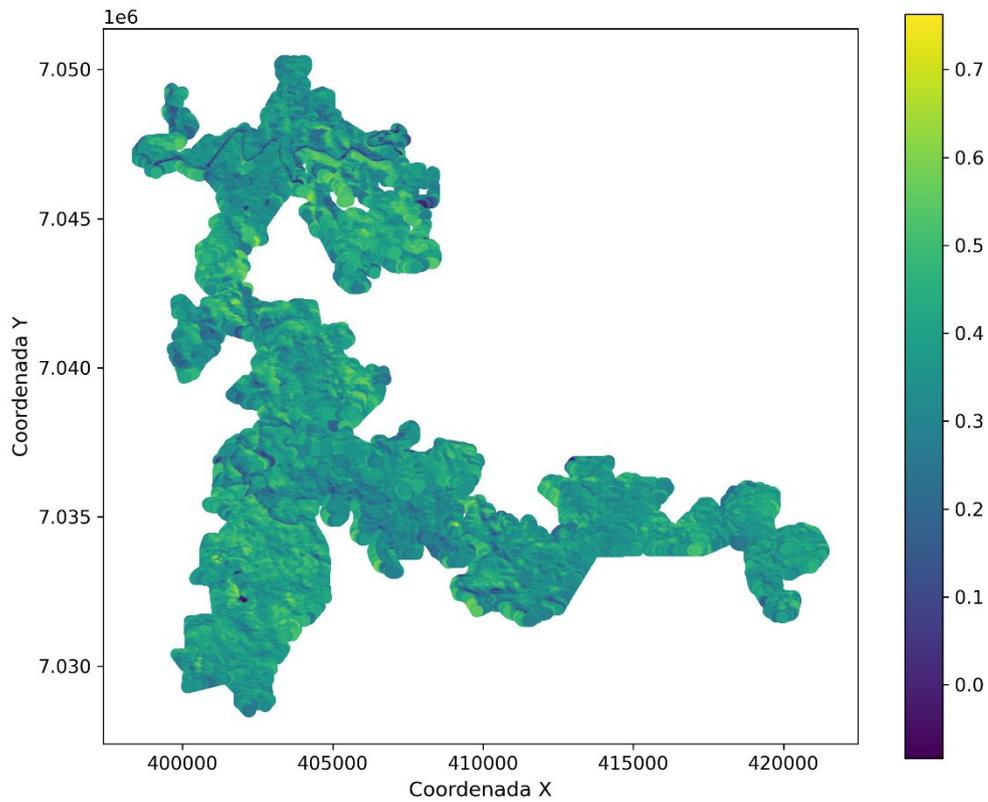


Legenda: (VEGPri) Vegetação primária; (VEGSec\_1) Vegetação secundária em estágio de sucessão inicial; (VEGSec\_2) Vegetação secundária em estágio de sucessão intermediário; (VEGSec\_3) Vegetação secundária em estágio de sucessão avançado.

Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 16 contém a interpretação visual dos dados calculados referente ao índice EVI, plotado para toda a extensão do parque. Apesar de poucas, é possível observar nuances na sua construção. Contudo, além do curso d'água que é mais distinto, as demais áreas com maior diferença na coloração, tal qual na Figura 14, são regiões de tipologias como agropecuária.

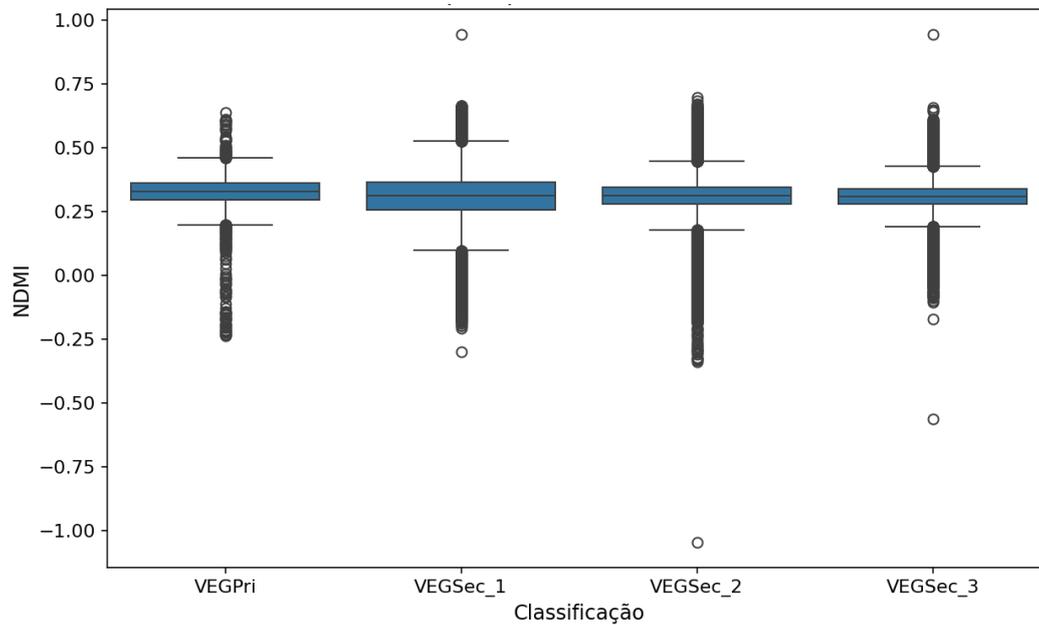
Figura 16 - Mapa do índice EVI



Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 17 contém os dados que representam o índice NDMI. As caixas também se apresentam de forma parelha, em um tamanho estreito e equivalente. A maior delas representa a vegetação secundária em estágio inicial, mas tal diferença não é tão representativa.

Figura 17 - Boxplot para o índice NDMI

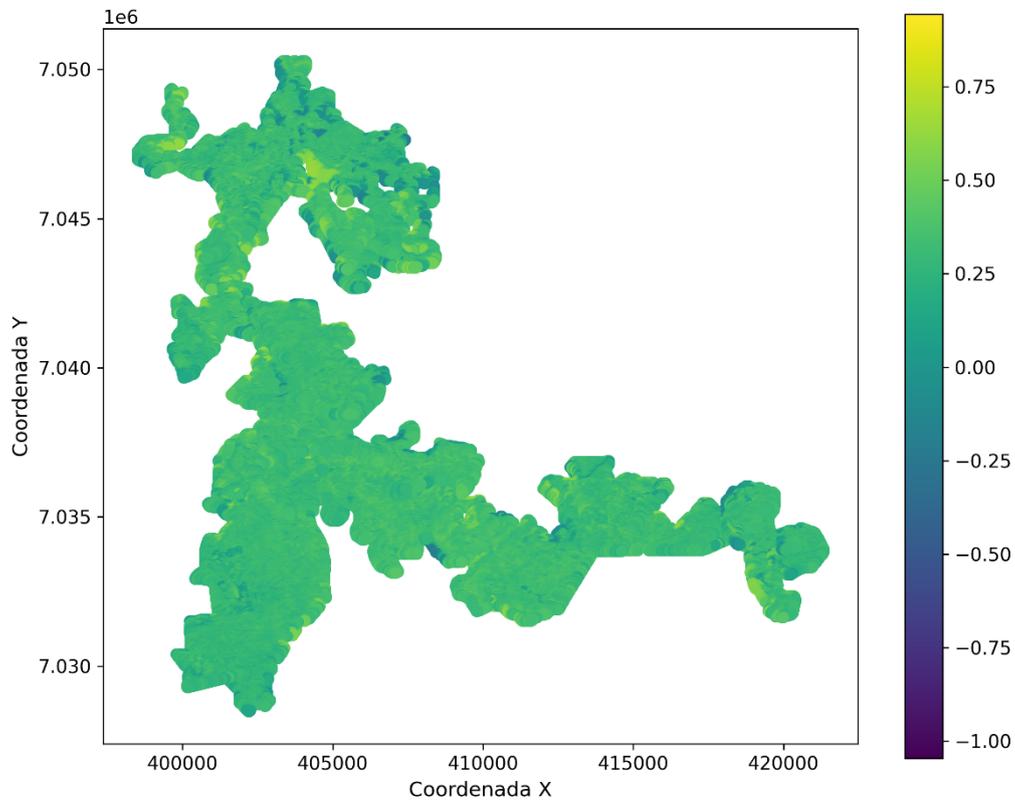


Legenda: (VEGPri) Vegetação primária; (VEGSec\_1) Vegetação secundária em estágio de sucessão inicial; (VEGSec\_2) Vegetação secundária em estágio de sucessão intermediário; (VEGSec\_3) Vegetação secundária em estágio de sucessão avançado.

Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 18 contém a interpretação visual dos dados calculados referente ao índice NDMI, plotado para toda a extensão do parque. Tal qual os demais mapas analisados, há pouca nuance para a área que representa as quatro tipologias e não há definição aparente para o curso d'água.

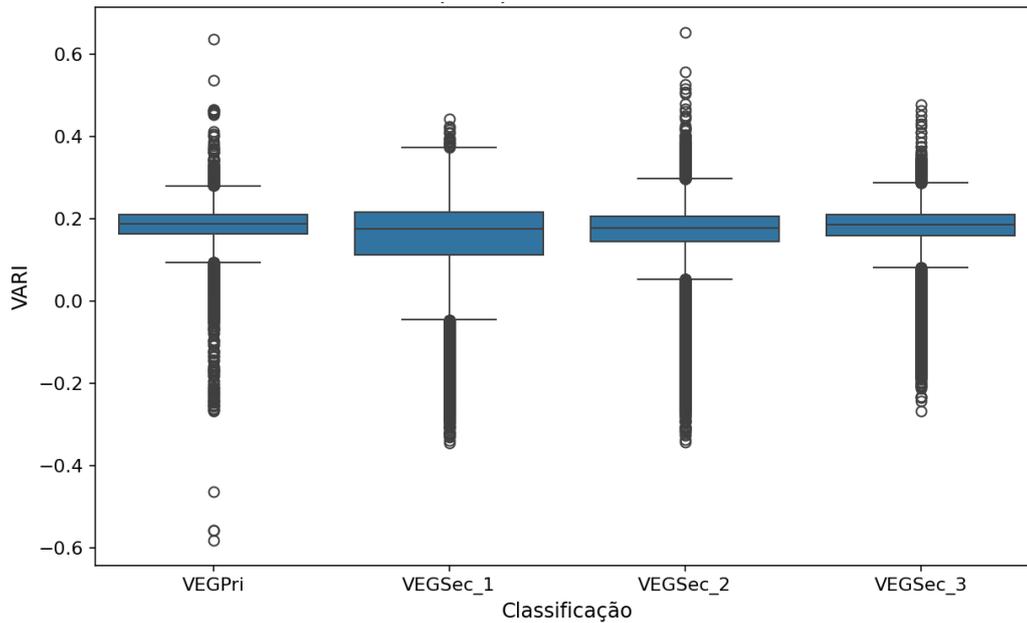
Figura 18 - Mapa do índice NDMI



Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 19 contém os dados que representam o índice VARI. Para este índice, as caixas também se encontram de forma parelha, com uma vantagem suave no tamanho para a vegetação secundária inicial.

Figura 19 - Boxplot para o índice VARI

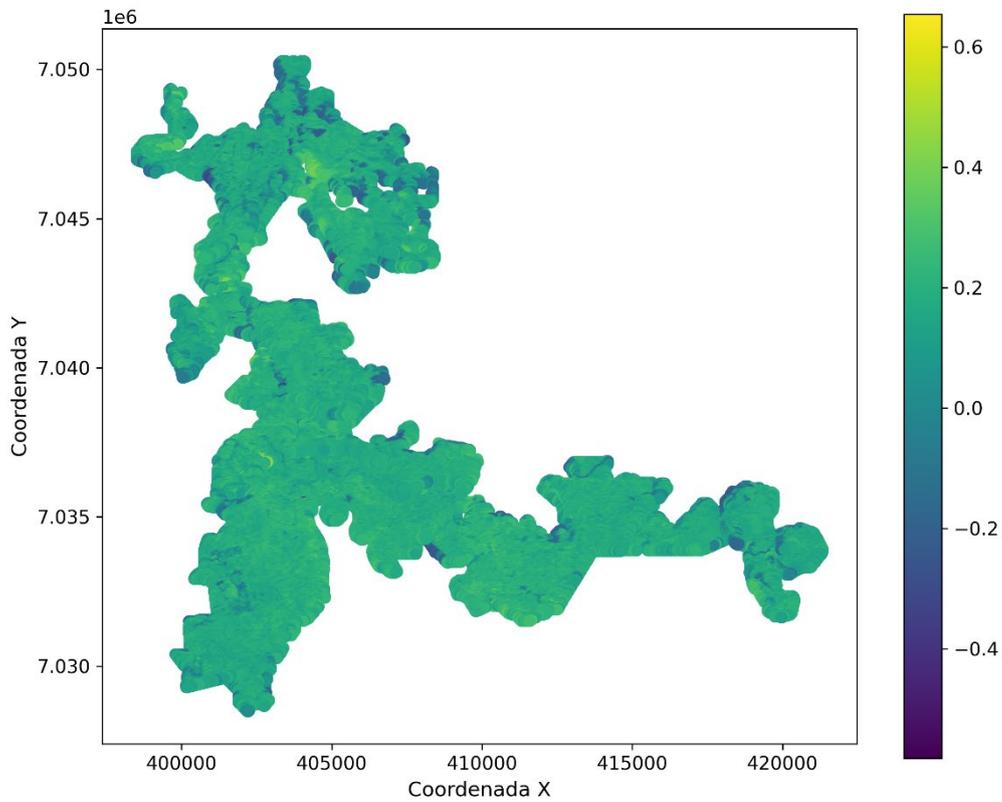


Legenda: (VEGPri) Vegetação primária; (VEGSec\_1) Vegetação secundária em estágio de sucessão inicial; (VEGSec\_2) Vegetação secundária em estágio de sucessão intermediário; (VEGSec\_3) Vegetação secundária em estágio de sucessão avançado.

Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 20 contém a interpretação visual dos dados calculados referente ao índice VARI, plotado para toda a extensão do parque. As manchas de valores diferentes do padrão da imagem recaem em sua maioria sobre áreas não representadas pelas quatro tipologias analisadas.

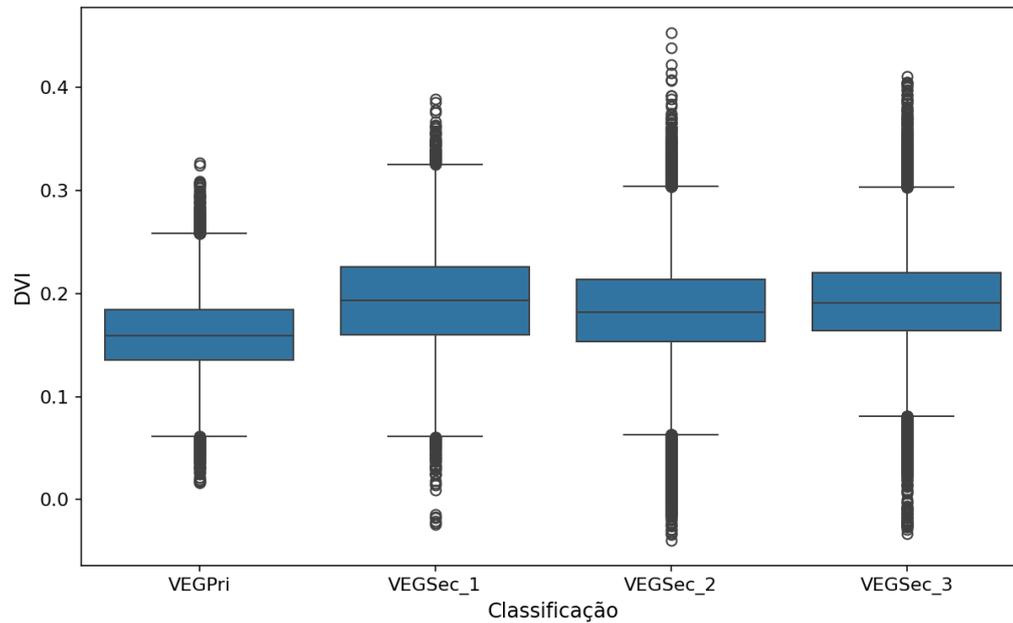
Figura 20 - Mapa do índice VARI



Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 21 contém os dados que representam o índice DVI. Junto do índice EVI, este é representado pelas maiores caixas, tendo em vista a amplitude dos dados. Elas, ainda parelhas apresentam um leve deslocamento entre si, com aquela referente à vegetação secundária em estágio inicial deslocada para cima, e a da vegetação primária, para baixo.

Figura 21 - Boxplot para o índice DVI

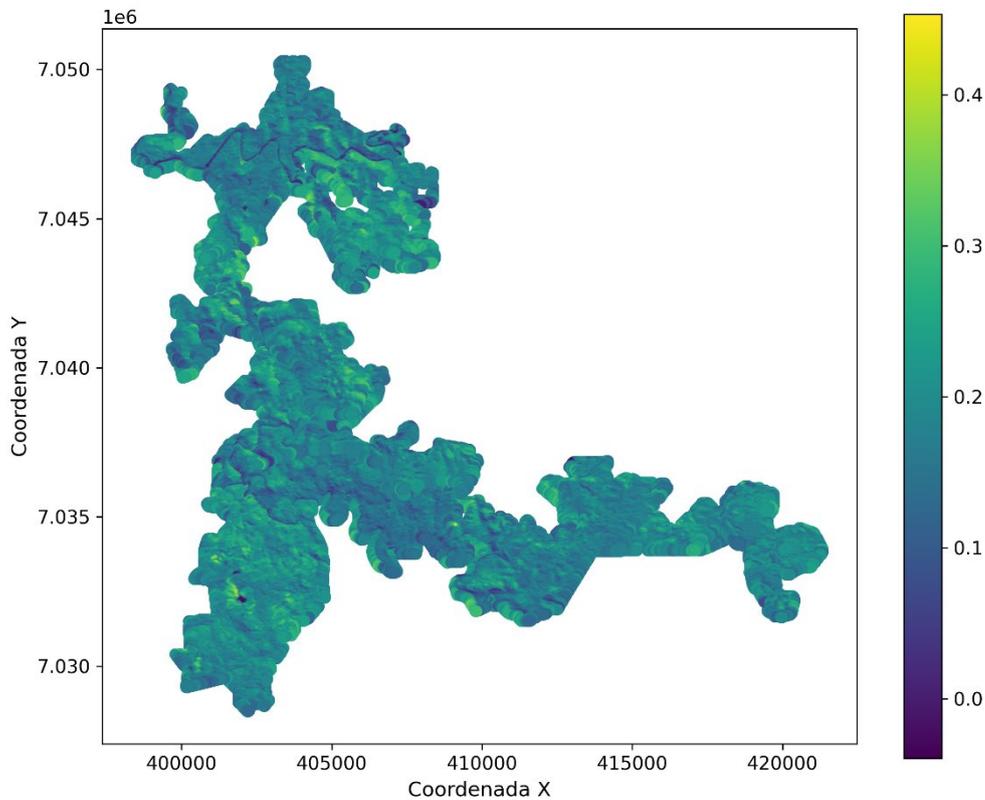


Legenda: (VEGPri) Vegetação primária; (VEGSec\_1) Vegetação secundária em estágio de sucessão inicial; (VEGSec\_2) Vegetação secundária em estágio de sucessão intermediário; (VEGSec\_3) Vegetação secundária em estágio de sucessão avançado.

Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 22 contém a interpretação visual dos dados calculados referente ao índice DVI, plotado para toda a extensão do parque. Além do curso d'água ser visível, mais nuances nesta figura são notadas.

Figura 22 - Mapa do índice DVI



Fonte: Autoria própria (2024).

#### 4.3.2 Sobre a implementação da lógica fuzzy

Mesmo com a implementação de bibliotecas que rodaram o código em paralelo, o tempo demandado para tal etapa foi extremamente elevado. Foram simulados 517.548 cenários, com um tempo médio de execução de quatro segundos por simulação. Este montante de tempo equivaleria a 24 dias de processamento, caso executado em uma única máquina.

A partir da execução do modelo, foi elaborada a Tabela 4. Ela correlaciona as classificações dos pixels a partir do levantamento de uso do solo representada pelas linhas, com as classificações dos pixels a partir do processamento pelo script, representada pelas colunas. Desta forma, nas suas linhas, consta a quantidade de objetos, ou pixels, pertencentes a cada tipologia, de acordo com o plano de manejo do PNA. O valor correspondente a cada coluna

representa a quantidade de objetos, ou *pixels*, classificados como cada tipologia a partir da simulação.

Tabela 4 - Comparação dos resultados finais das quantidades de pixels entre a tipologia consultadas e simuladas

	<b>Tipologia Fuzzy</b>	Veg. Primária	Veg. Secund. Inicial	Veg. Secund. Média	Veg. Secund. Avançada	Total
<b>Tipologia Real</b>	unidade	Pixels	Pixels	Pixels	Pixels	Pixels
Veg. Primária		2016	7315	3656	2637	15624
Veg. Secund. Inicial		1023	4875	3152	1619	10669
Veg. Secund. Média		7548	23774	14165	10678	56165
Veg. Secund. Avançada		4502	21508	11999	8920	46929
Total		15089	57472	32972	23854	129387

Fonte: Autoria própria (2024).

De forma geral, pode-se observar que a simulação não obteve um resultado positivo no reconhecimento de nenhuma das tipologias.

Como é destacado também através da Tabela 5, o desempenho mais promissor foi para a vegetação secundária em estágio inicial, a qual não atingiu taxa de acerto de 50%. O acerto global sobre as entradas foi de 23,17%.

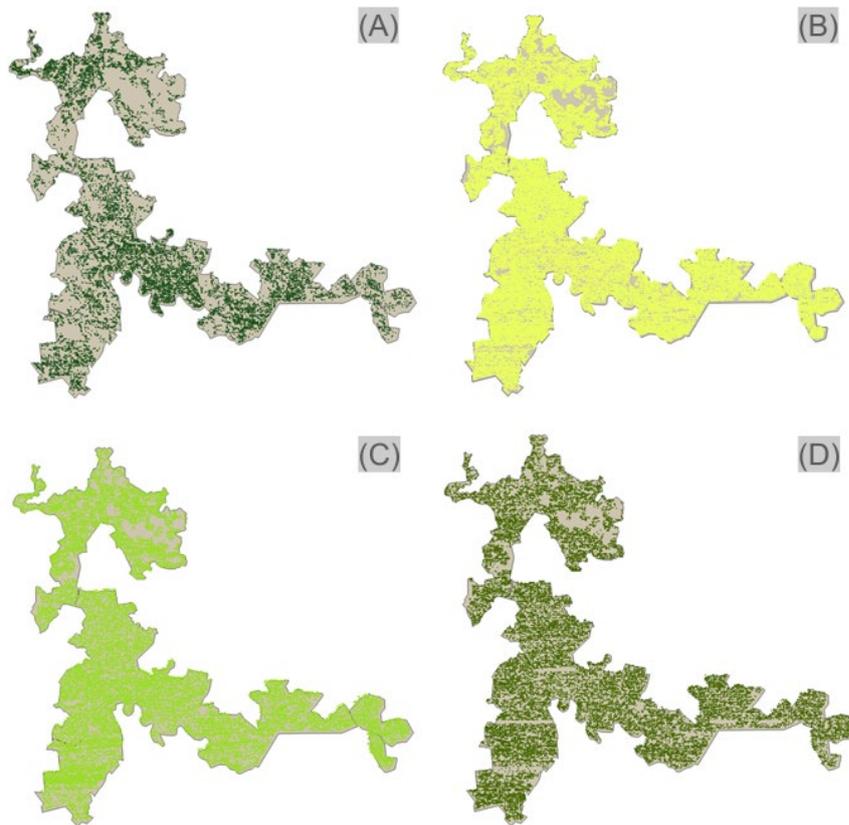
Tabela 5 - Relação de acertos por tipologia

<b>Tipologia</b>	<b>Acerto</b>
Veg. Primária	12,90%
Veg. Secundária Inicial	45,69%
Veg. Secundária Média	25,22%
Veg. Secundária Avançada	19,01%
Total	23,17%

Fonte: Autoria própria (2024).

Para se desenvolver uma interpretação visual dos resultados, foi elaborada a Figura 23, a qual contém a localização dos *pixels* para a classificação gerada. Dado o pouco agrupamento entre os *pixels* de mesmo estágio sucessional, a delimitação das áreas foi impossibilitada.

Figura 23 - Modelos finais para as simulações baseadas na lógica fuzzy



Legenda: (A) Vegetação primária; (B) Vegetação secundária em estágio inicial; (C) Vegetação secundária em estágio médio; (D) Vegetação secundária em estágio avançado

Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 23 mostra que a simulação retornou uma dispersão alta de dados, enquanto se esperava a geração de padrões em que os objetos estivessem concentrados, resultando na delimitação de áreas e sua classificação.

Do cenário final, entende-se que o treinamento do algoritmo não foi refinado o suficiente, tendo em vista a semelhança entre os boxplots para os índices destacados.

## 5 CONCLUSÃO

Foi possível elaborar um sistema que atribuisse classificações tipológicas a partir de índices de vegetação. Contudo, como o índice de acerto global foi de apenas 23,17%, o modelo construído não se demonstrou efetivo, diante dos parâmetros utilizados.

O cálculo dos índices de vegetação foi extremamente otimizado pela elaboração do script, em contraste com outras técnicas como planilhas, as quais não lidam tão bem com o volume de dados analisado. De modo geral, notou-se tendências similares nos índices, para todas as tipologias analisadas.

Há de se destacar que o resultado pode indicar um problema específico com o formato dos dados utilizados para treinar o algoritmo. Além dos problemas com a base de dados destacados, a uniformidade e constância dos índices para diversas tipologias podem indicar que aqueles escolhidos não são os mais adequados para este tipo de processamento. Também é possível que tal resultado indique problemas na elaboração do script, o qual foi capaz assimilar os dados, mas devido ao alto volume de simulações e tempo de execução, dificultou que fossem realizados novos testes a partir de outra conformação de índices vegetativos ou regras para a elaboração dos conjuntos descendentes.

Sugere-se que pesquisas futuras sejam desenvolvidas ajustando as possíveis falhas descobertas para confirmação da adequabilidade da lógica fuzzy à classificação de estágios sucessionais. Esta área pode se beneficiar com a adequação de lógicas computacionais das quais o processamento seja otimizado, bem como da análise da combinação de quais índices seria a mais adequada para se distinguir os serais de uma porção da Mata Atlântica.

## REFERÊNCIAS

BARROS, L. C.; BASSANEZI, R. C. **Tópicos de Lógica Fuzzy e Biomatemática**. 2. ed. Campinas: [s.n.].

BERVEGLIERI, A. et al. Analysis of trends and changes in the successional trajectories of tropical forest using the Landsat NDVI time series. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 24, nov. 2021.

BORGES, L. E. **PYTHON PARA DESENVOLVEDORES**. 1. ed. [s.l.] Novatec, 2014.

BRANCO, A. F. V. C. B. et al. Avaliação da perda da biodiversidade na Mata Atlântica. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 4, p. 1885–1909, 17 nov. 2021.

BRASIL. Lei nº 6.001, de 19 de Dezembro de 1973. . dez. 1973.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de Agosto de 1981. 31 ago. 1981.

BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. . 5 out. 1988.

BRASIL. Lei nº 9.958, de 18 de Julho de 2000. . 18 jul. 2000.

BRASIL. Lei nº 11.428, de 22 de Dezembro de 2006. . 22 dez. 2006.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de Maio de 2012. . 25 maio 2012.

BRASIL; MMA. **Mata Atlântica**. Disponível em: <[https://antigo.mma.gov.br/biomas/mata-atlantica\\_emdesenvolvimento.html](https://antigo.mma.gov.br/biomas/mata-atlantica_emdesenvolvimento.html)>. Acesso em: 17 set. 2024.

BRESSANE, A. et al. Computer-aided classification of successional stage in subtropical Atlantic Forest: a proposal based on fuzzy artificial intelligence. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 195, n. 1, 1 jan. 2023.

CONAMA, C. N. DO M. A.; BRASIL. **Resolução CONAMA nº004 de 04 de maio de 1994.** , 4 maio 1994.

EMBRAPA TERRITORIAL. **Satélites de Monitoramento.** Disponível em: <<https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento>>. Acesso em: 26 set. 2024.

FREITAS, S. R. DE; MELLO, M. C. S. DE; CRUZ, C. B. M. Relationships between forest structure and vegetation indices in Atlantic Rainforest. **Forest Ecology and Management** , v. 218, n. 1–3, p. 353–362, out. 2005.

GITELSON, A. A. et al. Vegetation and soil lines in visible spectral space: A concept and technique for remote estimation of vegetation fraction. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 13, p. 2537–2562, 25 jan. 2002.

GODDARD SPACE FLIGHT CENTER. **LANDSAT 1.** Disponível em: <<https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-1/>>. Acesso em: 28 set. 2024.

IBGE. Manual Técnico da Vegetação Brasileira, 2ª edição. Em: **Manuais Técnicos em Geociências.** Rio de Janeiro: [s.n.]. v. 1.

IBGE. Censo Brasileiro de 2010. 2012b.

IBGE. Censo Brasileiro de 2022. 2022.

KLIR, G. J.; YUAN, B. **Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications.** 1. ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall PTR, 1995.

LEWINSOHN, T. M.; PRADO, P. I. Quantas espécies há no Brasil. **Megadiversidade**, v. 1, n. 1, p. 36–42, jul. 2005.

LIMA, H. P. **Uma abordagem para construção de sistemas fuzzy baseados em regras integrando conhecimento de especialistas e extraído de dados.** São Carlos - SP: Universidade Federal de São Carlos, set. 2015.

MEHER, S. K.; SHANKAR, B. U.; GHOSH, A. Multispectral Remote Sensing Image Classification Using Wavelet Based Features. Em: NACHTEGAEL MIKE AND VAN DER WEKEN, D. AND K. E. E. AND P. W. (Ed.). **Soft Computing in Image Processing: Recent Advances.** Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007. v. 210p. 3–34.

MÉNDEZ, L. A. **Accuracy and Fuzziness. A Life in Science and Politics.** Cham: Springer International Publishing, 2015. v. 323

MENHAJ, F. F.; BAGHER, M. A Fuzzy Logic Control Based Approach for Image Filtering. Em: KERRE ETIENNE E. AND NACHTEGAEL, M. (Ed.). **Fuzzy Techniques in Image Processing.** Heidelberg: Physica-Verlag HD, 2000. v. 52p. 194–221.

MMA; ICMBIO. **Plano de Manejo do Parque Nacional das Araucárias.** Brasília: [s.n.].

MYERS, N. **Threatened Biotas: “Hot Spots” in Tropical Forests.** Oxford: [s.n.]. . Acesso em: 15 set. 2024.

PAPÁ, C.; BRITOS, A. V. Jajepota ka’aguy rokýre: Encantar-se com os brotos da floresta. **Cadernos de Campo (São Paulo - 1991)**, v. 32, n. 2, p. e215752, 22 dez. 2023.

PRADO, F. B. et al. **REGIME JURÍDICO DA MATA ATLÂNTICA E O RISCO À SOBREVIVÊNCIA IN SITU DE ESPÉCIES AMEAÇADAS.** [s.l: s.n.].

RAEVA, P. L.; ŠEDINA, J.; DLESK, A. Monitoring of crop fields using multispectral and thermal imagery from UAV. **European Journal of Remote Sensing**, v. 52, n. sup1, p. 192–201, 28 mar. 2019.

ROUSE, R. W. H.; HAAS, J. A. W.; DEERING, D. W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains With ERTS. **NASA. Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symp.**, v. 1, p. 309–317, 1 jan. 1974.

SOS MATA ATLÂNTICA; INPE. **Atlas dos Remanescentes Florestais da Mata Atlântica, PERÍODO 2022-2023**. São Paulo: [s.n.].

SOUZA, C. DE et al. Técnicas de Sensoriamento Remoto[...]\_Celso Souza. **Ciência Florestal**, v. 17, n. 4, p. 409–417, 30 dez. 2007.

SOUZA FILHO, C. R. DE et al. Detecção de exsudações de hidrocarbonetos por geobotânica e sensoriamento remoto multi-temporal: estudo de caso no Remanso do Fogo (MG). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 38, p. 228–243, jun. 2008.

TEIXEIRA, G. M. et al. Análise de classificadores de estágios sucessionais em um fragmento de Mata Atlântica. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 4, n. 2, p. 88–96, 2019.

USGS. **Landsat Surface Reflectance-derived Spectral Indices**. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-surface-reflectance-derived-spectral-indices>>. Acesso em: 28 set. 2024.

USGS. **Landsat 7 Extended Science Mission**. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-7>>. Acesso em: 7 nov. 2024.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, n. 3, p. 338–353, jun. 1965.

ZERAFA, S. Revolutionising Agriculture: A Comprehensive Review of Remote Sensing Techniques Utilising Drones. **27th PARIS International Conference on “Advances in Agricultural, Biological & Environmental Sciences”**, abr. 2023.