



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

LUCAS CESAR FIGUEIREDO HOEPFNER DE ALMEIDA

Transformações na Condição Hidrogeomorfológica da Bacia do Ribeirão Brandão
(Volta Redonda, RJ): uma Análise com Índices Espectrais e Referencial
Geomorfológico

Rio de Janeiro

2025

LUCAS CESAR FIGUEIREDO HOEPFNER DE ALMEIDA

Transformações na Condição Hidrogeomorfológica da Bacia do Ribeirão Brandão
(Volta Redonda, RJ): uma Análise com Índices Espectrais e Referencial
Geomorfológico

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia do Departamento de Geografia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro como requisito para a obtenção do título de Mestre em Geografia

Orientadora: Prof.^a Dr.^a. Maria Naíse de Oliveira Peixoto

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Iara Silveira do Nascimento.

Rio de Janeiro

2025

CIP - Catalogação na Publicação

A447t Almeida, Lucas Cesar Figueiredo Hoepfner de
Transformações na Condição Hidrogeomorfológica da
Bacia do Ribeirão Brandão (Volta Redonda, RJ): uma
Análise com Índices Espectrais e Referencial
Geomorfológico / Lucas Cesar Figueiredo Hoepfner de
Almeida. -- Rio de Janeiro, 2025.
166 f.

Orientadora: Maria Naise de Oliveira Peixoto.
Coorientadora: Iara Silveira do Nascimento.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do
Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa
de Pós-Graduação em Geografia, 2025.

1. Geomorfologia Fluvial. 2. River Styles®. 3.
Sensoriamento Remoto. 4. Urbanização. 5. Ribeirão
Brandão. I. Peixoto, Maria Naise de Oliveira,
orient. II. Nascimento, Iara Silveira do, coorient.
III. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a), sob a responsabilidade de Miguel Romeu Amorim Neto - CRB-7/6283.

LUCAS CESAR FIGUEIREDO HOEPFNER DE ALMEIDA

Transformações na Condição Hidrogeomorfológica da Bacia do Ribeirão Brandão
(Volta Redonda, RJ): uma Análise com Índices Espectrais e Referencial
Geomorfológico

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Geografia do
Departamento de Geografia do Instituto de
Geociências, Universidade Federal do Rio
de Janeiro como requisito para a obtenção
do título de Mestre em Geografia.

Aprovada em: 17/12/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Maria Naíse de Oliveira Peixoto (Orientadora)
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Prof^a. Dr^a. Iara Silveira do Nascimento (Coorientadora)
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Prof^a. Dr^a. Elizabeth Maria Feitosa da Rocha de Souza
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Prof. Dr. Eduardo Vieira de Mello
Colégio Pedro II

Este trabalho é dedicado à Aline, minha esposa, companheira de todas as horas, que caminha ao meu lado desde o início desta jornada acadêmica. Pela presença constante, pelo amor paciente e pela confiança inabalável, dedico a você cada página deste trabalho, que também é fruto do seu apoio, das suas renúncias e da sua crença de que eu seria capaz de chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa, Aline, pelo carinho, compreensão e incentivo em todos os momentos deste percurso. Sua paciência diante das ausências, das longas horas de estudo e das incertezas do caminho foi essencial para que eu pudesse me manter firme. A sua capacidade de me apoiar nos dias difíceis e de celebrar comigo cada pequena conquista fez desta trajetória algo muito mais leve e significativo.

À minha orientadora, professora Maria Naíse de Oliveira Peixoto, pela confiança depositada em mim desde o início, pela paciência com o tempo próprio de amadurecimento das ideias e pelo impressionante desejo de fazer as coisas darem certo. Sua forma cuidadosa de orientar, sempre aliando rigor acadêmico, generosidade intelectual e sensibilidade humana, foi determinante para que este trabalho se concretizasse. A cada leitura, sugestão, correção e conversa, aprendi não apenas sobre pesquisa, mas também sobre compromisso ético e responsabilidade com o conhecimento produzido.

À minha coorientadora, professora Iara, pelas palavras sempre positivas, pelo suporte constante e pela disponibilidade em todos os momentos em que precisei de orientação, esclarecimentos ou apenas de um olhar encorajador.

Aos meus amigos, todos eles, que compartilharam comigo as dores e as alegrias do mestrado. Agradeço pelas conversas, pelos desabaços, pelas trocas de ideias, pelos incentivos e pelas pausas necessárias para respirar em meio à rotina intensa. Cada palavra de apoio, cada mensagem, cada encontro que ajudou a sustentar este percurso e a lembrar que ninguém atravessa uma jornada como esta sozinho.

Aos meus pais, pelo apoio, pelo exemplo e por acompanharem, de diferentes maneiras, esta trajetória. A formação que recebi em casa, os valores transmitidos e o apoio silencioso em muitos momentos estão presentes em cada escolha que me trouxe até aqui.

A todas as pessoas que, de algum modo, contribuíram para que este trabalho fosse possível – seja por uma orientação, uma conversa, uma crítica construtiva, um gesto de amizade ou um simples gesto de incentivo – registro aqui meu sincero agradecimento.

À minha avó Graça e à minha tia Denise que, me apoiam incondicionalmente, independente do desafio que estou enfrentando.

Ao meu avô Waldyr que se foi esse ano, mas sempre me deu afeto e atenção
todas as vezes que precisei.

RESUMO

Esta pesquisa analisa as transformações geomorfológicas e ambientais na bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão, situada no município de Volta Redonda (RJ), no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul, área submetida a intensos processos de urbanização e industrialização desde meados do século XX. O objetivo central é identificar e analisar tendências de mudanças na cobertura e no uso da terra em bacias hidrográficas afluentes do rio Paraíba do Sul, por meio da aplicação de índices espectrais derivados de sensoriamento remoto, de modo a subsidiar diagnósticos complementares voltados à detecção de trajetórias de transformação dos sistemas fluviais. Para tanto, adotou-se como recorte espacial a bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão e a sub-bacia do Córrego do Curral-Leste, considerando o período de 2014 a 2024, em função das significativas alterações tecnogênicas identificadas na área nesse intervalo temporal. A pesquisa baseia-se no processamento de 106 imagens do satélite Landsat 8, a partir das quais foram calculados o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI), o Índice de Umidade por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Water Index* – NDWI) e o Índice de Área Construída por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Built-up Index* – NDBI). As médias anuais desses índices foram espacializadas em mapas temáticos e analisadas de forma qualitativa e quantitativa, sendo integradas a uma leitura geomorfológica previamente desenvolvida para o sistema fluvial, com ênfase no confinamento do vale e na tipologia das margens. Os resultados indicam que os valores médios do NDVI variam entre 0,28 e 0,31, refletindo o predomínio de vegetação rasteira e descontínua na bacia. O NDWI apresenta valores persistentemente negativos, entre -0,31 e -0,285, denotando baixa disponibilidade hídrica superficial, enquanto o NDBI mantém valores negativos entre -0,115 e -0,08, caracterizando um grau intermediário de artificialização, no qual superfícies construídas se intercalam com solos expostos e remanescentes vegetais. A relação inversa observada entre NDVI e NDBI evidencia que períodos com maior vigor relativo da vegetação correspondem a menor presença de superfícies impermeáveis, sugerindo a redução progressiva da cobertura vegetal residual em áreas associadas à expansão urbana. A análise da cobertura e uso da terra revela redução da vegetação rasteira, aumento expressivo de solo exposto e incremento moderado de áreas urbanizadas e arborizadas, resultando em um mosaico fragmentado de usos, cujas

implicações se refletem nas condições geomorfológicas dos sistemas fluviais analisados.

Palavras-chave: Geomorfologia Fluvial; River Styles®; Sensoriamento Remoto; Urbanização; Ribeirão Brandão.

ABSTRACT

This research analyzes geomorphological and environmental transformations in the Ribeirão Brandão watershed, located in the municipality of Volta Redonda (Rio de Janeiro State, Brazil), in the Middle Paraíba do Sul River Valley—an area subjected to intense urbanization and industrialization processes since the mid-twentieth century. The main objective is to identify and analyze trends in land-use and land-cover change in watersheds tributary to the Paraíba do Sul River through the application of spectral indices derived from remote sensing, in order to support complementary diagnostic assessments aimed at detecting transformation trajectories of fluvial systems. To this end, the Ribeirão Brandão watershed and the Curral-Leste Stream sub-basin were selected as the spatial focus, considering the period from 2014 to 2024 due to significant technogenic alterations identified in this interval. The study is based on the processing of 106 Landsat 8 satellite images, from which the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), the Normalized Difference Water Index (NDWI), and the Normalized Difference Built-up Index (NDBI) were calculated. Annual mean values of these indices were spatialized into thematic maps and analyzed both qualitatively and quantitatively, and subsequently integrated with a previously developed geomorphological interpretation of the fluvial system, with emphasis on valley confinement and bank typology. The results indicate that mean NDVI values range from 0.28 to 0.31, reflecting the predominance of sparse and discontinuous vegetation within the basin. NDWI values are persistently negative, ranging from -0.31 to -0.285 , indicating low surface water availability, whereas NDBI values remain negative, between -0.115 and -0.08 , characterizing an intermediate degree of artificialization in which built-up surfaces coexist with exposed soils and residual vegetation. The inverse relationship observed between NDVI and NDBI shows that periods of higher relative vegetation vigor correspond to a lower presence of impervious surfaces, suggesting a progressive reduction of residual vegetation in areas associated with urban expansion. Land-use and land-cover analysis reveals a decrease in grassland vegetation, a marked increase in exposed soil, and a moderate expansion of urbanized and arboreal areas, resulting in a fragmented land-use mosaic whose implications are reflected in the geomorphological conditions of the analyzed fluvial systems.

Keywords: Fluvial Geomorphology; River Styles®; Remote Sensing; Urbanization; Ribeirão Brandão Watershed.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Localização da bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão, afluente do Rio Paraíba do Sul em Volta Redonda (RJ).....	22
Figura 2- Localização dos principais canais coletores da rede fluvial da bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão, afluente do Rio Paraíba do Sul na região do Médio Vale do Paraíba do Sul fluminense.	23
Figura 3: Registros fotográficos da evolução urbana de volta redonda.	27
Figura 4: Evolução urbana de Volta Redonda com base em: mapeamentos sobre a extensão das áreas urbanas nos períodos até 1955, 1956/1965, 1965/1980 e 1980/1990 e base cartográfica do IBGE.....	32
Figura 5- Geologia da região que abrange o Médio Vale do Rio Paraíba do Sul fluminense, onde se insere bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão.....	34
Figura 6 - Mapa hipsométrico do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul fluminense, evidenciando a depressão tectônica onde se inserem os sistemas fluviais tributários do rio Paraíba do Sul. Fonte: Negrão (2015).	36
Figura 7 – Principais compartimentos geomorfológicos da área do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul fluminense onde se insere a bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão, delimitada em vermelho. Fonte: (Silva, 2002).	38
Figura 8 - Visualização das feições de rampas de alúvio-colúvio em continuidade topográfica com o nível de terraço fluvial superior (T1) no Gráben Casa de Pedra, Volta Redonda (RJ). Foto: Leandra Castro (2022).	39
Figura 9 - Exposição de coberturas superficiais em encostas e aterramento de fundo de vale em uma cabeceira de drenagem devido a práticas de terraplanagem para implantação de loteamentos do Setor Sul de Volta Redonda (RJ), em área de divisa com o município de Pinheiral (RJ). Em segundo plano, observa-se os diferentes compartimentos de colinas, morros e degraus reafeiçoeados, que caracterizam o relevo regional. Foto: Lucas Almeida (2022).	40
Figura 10 - (A) Formação de novas superfícies e (B) exposição de coberturas superficiais na base de encostas e no <i>hollow</i> de Cabeceiras de Drenagem em Anfiteatro, devido à escavação para retirada de materiais de empréstimo pra obras. Em (B) observa-se também a formação de sulcos erosivos e ravinas.....	41
Figura 11 - Fluxograma metodológico das etapas	61
Figura 12 - Mapa de cobertura e uso da terra da bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão - anos de 2014 e 2024	84

Figura 13: Transformações da classe solo exposto entre 2014 e 2024 na bacia do Ribeirão Brandão.....	87
Figura 14: Transformações da classe vegetação rasteira entre 2014 e 2024 na bacia do Ribeirão Brandão.	88
Figura 15: Transformações da classe área arborizada entre 2014 e 2024 na bacia do Ribeirão Brandão.....	90
Figura 16: Transformações da classe urbano-edificações entre 2014 e 2024 na bacia do Ribeirão Brandão.	91
Figura 17 – Transformações da classe área arborizada entre 2014 e 2024 na sub bacia do Curral-Leste, tributário do Ribeirão Brandão.....	96
Figura 18 – Transformações da classe vegetação rasteira entre 2014 e 2024 na sub bacia do Curral-Leste, tributário do Ribeirão Brandão.	97
Figura 19 – Transformações da classe solo exposto entre 2014 e 2024 na sub bacia do Curral-Leste, tributário do Ribeirão Brandão.....	100
Figura 20 – Transformações da classe urbano entre 2014 e 2024 na sub bacia do Curral-Leste, tributário do Ribeirão Brandão.	101
Figura 21 - Mapa das médias anuais do NDVI de 2014 e 2024	104
Figura 22 - Mapa das médias anuais do NDWI de 2014 e 2024.....	110
Figura 23 - Mapa das médias anuais do NDBI de 2014 e 2024	118
Figura 24 - Tipos de margens de canal dos coletores principais do Ribeirão Brandão, segundo o grau de confinamento das do Rio Paraíba do Sul em Volta Redonda (RJ) . Fonte: Almeida (2022).	132
Figura 25 - Tipo de confinamento das margens de canal dos coletores principais do Ribeirão Brandão, afluente do Rio Paraíba do Sul em Volta Redonda (RJ), segundo o grau de modificações antropogênicas. Fonte: Almeida (2022).....	133
Figura 26- Elementos confinantes das margens de canal dos coletores principais do Ribeirão Brandão, afluente do Rio Paraíba do Sul em Volta Redonda (RJ). Fonte: Almeida (2022).....	134

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Histograma KDE do NDVI (2014-2024).	106
Gráfico 2 - Boxplot das Médias do NDVI (2014 - 2024).	107
Gráfico 3 - Histograma KDE do NDWI (2014 - 2024).	112
Gráfico 4 - <i>Boxplot</i> das Médias do NDWI (2014 - 2024).	114
Gráfico 5 - Histograma KDE do NDBI (2014-2024).	119
Gráfico 6 - <i>Boxplot</i> das Médias do NDBI (2014 - 2024).	121
Gráfico 7 - Relação entre NDWI e NDVI (2014-2024).	122
Gráfico 8 - Relação entre NDVI e NDBI (2014-2024).	124
Gráfico 9 - Evolução das Médias Anuais de NDVI (2014-2024).	125
Gráfico 10 - Evolução das Médias Anuais de NDWI (2014-2024).	127
Gráfico 11 - Evolução das Médias Anuais de NDBI (2014-2024).	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Matriz de transição entre as classes de 2014 e 2024 para a bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão.	83
Tabela 2: Transições entre classes de cobertura e uso da terra, expressos em valores em área (ha) e como percentual em relação à área da classe de origem na sub bacia do Córrego do Curral-Leste, Volta Redonda (RJ).	94
Tabela 3- Quadro Síntese	135
Tabela 4 - Tabela de Imagens.....	147

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ArcPy – (ArcGIS Python) Biblioteca do ArcGIS para automação de processos geoespaciais em Python.

CSN – Companhia Siderúrgica Nacional

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

KDE – Kernel Density Estimation (Estimativa de Densidade por Kernel)

NASA – National Aeronautics and Space Administration

NDBI – Normalized Difference Built-up Index

NDVI – Normalized Difference Vegetation Index

NDWI – Normalized Difference Water Index

NumPy – Numerical Python (Python Numérico)

Rasterio – (Raster I/O) Biblioteca Python para leitura, escrita e análise de dados raster geoespaciais.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVOS	19
3. ÁREA DE ESTUDO	20
3.1. Localização	20
3.2. Histórico de Ocupação e Uso da Terra	24
3.3. Evolução Urbana de Volta Redonda	25
3.4. Arcabouço Geológico e Geomorfológico	33
3.5. Características Climáticas	42
3.6. Cobertura vegetal e uso da terra	42
4. BASE CONCEITUAL	43
4.1. Dinâmica dos sistemas fluviais	43
4.1.1. Caráter e Comportamento Fluviais	44
4.1.2. Condição Geomorfológica	45
4.1.3. Potencial de Recuperação do Sistema Fluvial	46
4.1.4. Aplicações em Gestão e Manejo Fluvial	47
4.1.5. Estilos de Rio (River Styles®): conceito e aplicação no estudo	49
4.2. Índices Espectrais por Sensoriamento Remoto	50
4.2.1. Índice NDWI e suas aplicações	52
4.2.2. Índice NDVI e suas aplicações	54
4.2.3. Índice NDBI e suas aplicações	56
4.3. Relações entre NDVI, NDWI e NDBI	58
<i>Complementaridade Espectral e Temática</i>	<i>58</i>
<i>Interpretação Multiescalar</i>	<i>58</i>
<i>Identificação de Áreas de Transição</i>	<i>59</i>
<i>Relação com o Ciclo Hidrológico</i>	<i>59</i>
<i>Aplicação em Modelagem da Cobertura e Uso do Solo</i>	<i>59</i>
5. METODOLOGIA	59
5.1. Aquisição e preparação dos dados de sensoriamento remoto	61
5.2. Automação do processamento e geração dos produtos	62
5.3. Articulação entre metodologia e base conceitual geomorfológica	62
5.4. Escala de análise e recortes espaciais	63
5.5. Limitações e incertezas dos dados	63
5.6. Geração de índices	64

Cálculo do NDVI.....	64
Cálculo do NDBI.....	65
Cálculo do NDWI.....	67
Aplicação de máscara de recorte de área.....	68
Cálculo da média do NDVI	70
Cálculo de média do NDBI	71
Cálculo de média NDWI	72
Geração de gráficos	74
Cálculo de médias anuais dos índices NDVI, NDWI e NDBI.....	74
Cálculo de média mensal dos índices NDVI, NDBI e NDWI	76
5.7 Composição de bandas	78
Código utilizado para realizar a composição de bandas	79
5.8 Mapeamento de cobertura e uso da terra.....	80
6. RESULTADOS.....	82
6.1. Modificações na cobertura e uso da terra no período 2014-2024.....	82
6.2. Análise do NDVI.....	102
6.3. Análise do NDWI.....	109
6.4. Análise do NDBI.....	115
6.5. Relações entre os índices.....	122
6.6. Comportamento das médias anuais	125
6.7. Identificação de tendências de transformação fluvial.....	129
6.8. Integração entre índices espectrais e confinamento fluvial.....	136
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	138
8. REFERÊNCIAS	140
ANEXOS	147

1. INTRODUÇÃO

O avanço acelerado das atividades econômicas sobre a superfície terrestre tem promovido transformações profundas nos ambientes fluviais, com repercussões diretas tanto sobre a funcionalidade dos sistemas geomorfológicos quanto sobre as dinâmicas socioambientais associadas. Intervenções tecnogênicas, como a retificação de canais, a concretagem de margens e a urbanização de áreas ripárias, alteram de forma substancial os processos geomorfológicos e ecológicos, impondo a necessidade de abordagens integradas capazes de apreender as relações espaciais e temporais envolvidas nessas transformações. O desenvolvimento dessas abordagens pressupõe, por um lado, uma base conceitual sólida sobre a dinâmica fluvial e, por outro, procedimentos analíticos que permitam interpretar a distribuição espacial e a evolução dos fenômenos que condicionam a transformação dos sistemas fluviais.

Nesse contexto, a presente pesquisa investiga a utilização de índices espectrais derivados de imagens do satélite Landsat 8 como suporte à identificação de tendências de modificação da cobertura e do uso da terra em bacias hidrográficas, com implicações para a compreensão das trajetórias de transformação dos sistemas fluviais sob influência da urbanização. O recorte espacial adotado corresponde à bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão, localizada nos municípios de Volta Redonda e Barra Mansa, no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul. Trata-se de uma área marcada por dinâmicas socioambientais complexas, fortemente associadas à implantação e consolidação do modelo urbano-industrial brasileiro a partir da segunda metade do século XX, conforme discutido por Mello (2021).

Desde a instalação da Companhia Siderúrgica Nacional em Volta Redonda, na década de 1940, o crescimento urbano e industrial do município esteve acompanhado por intensas modificações na paisagem fluvial. Estudos desenvolvidos por Del Pozo (2010), Ribeiro (2016), Mello (2021) e Figueiredo (2024) evidenciam que tais transformações resultaram em impactos expressivos sobre a hidrodinâmica e a morfologia dos rios e das cabeceiras de drenagem. Entre esses impactos destacam-se a descaracterização de segmentos fluviais, a desconexão entre canais e planícies de inundação e o aterramento de áreas embrejadas nas nascentes formadoras da rede de drenagem. O Ribeirão Brandão, afluente direto do rio Paraíba do Sul em seu médio vale, constitui um exemplo representativo dessas interações, apresentando feições tecnogênicas recorrentes, como aterros, impermeabilização de superfícies e

edificações sobre planícies aluviais, as quais contribuem para o aumento da vulnerabilidade a eventos extremos, como inundações.

Diante desse cenário, a pesquisa busca contribuir para a definição de procedimentos de avaliação das mudanças e permanências na cobertura e no uso da terra, a partir da análise integrada de índices espectrais. São empregados o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*), o Índice de Água por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Water Index*) e o Índice de Área Construída por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Built-up Index*). A análise desses indicadores possibilita identificar padrões espaciais e temporais associados a condições de impacto e pressão antrópica, contribuindo para a interpretação das trajetórias de transformação dos sistemas fluviais em escala de bacia hidrográfica. Essa abordagem fundamenta-se no potencial do sensoriamento remoto em fornecer informações consistentes, abrangentes e espacialmente contínuas sobre extensas áreas da superfície terrestre, especialmente a partir da disponibilidade de séries temporais gratuitas e consolidadas, como a série Landsat.

O desenvolvimento da análise apoia-se no arcabouço conceitual e metodológico construído ao longo de décadas de pesquisas realizadas pelo Núcleo de Estudos do Quaternário e Tecnógeno da Universidade Federal do Rio de Janeiro (NEQUAT/UFRJ) no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul. Esses estudos abordam a evolução dos sistemas de drenagem regionais por meio da identificação e do mapeamento de feições deposicionais associadas a sequências sedimentares quaternárias e depósitos tecnogênicos, bem como de feições erosivas em diferentes condições de conectividade com a rede fluvial. Também são incorporadas contribuições relacionadas à classificação, conectividade e confinamento fluvial, incluindo a abordagem dos Estilos de Rio (River Styles®), proposta por Brierley e Fryirs (2005), utilizada neste trabalho como referência interpretativa para o diálogo entre padrões geomorfológicos e respostas espectrais da paisagem.

Del Pozo (2011) e Ribeiro (2016) demonstram que a interação entre processos deposicionais e erosivos, associada às mudanças no uso do solo ao longo das últimas décadas, resulta em padrões diferenciados de conectividade da paisagem e na configuração de trechos de canais embrejados. Esses padrões evidenciam a importância da produção de informações que auxiliem na compreensão das condições de sensibilidade e resiliência dos sistemas fluviais e das bacias hidrográficas frente às transformações ambientais. Figueiredo (2024), por sua vez, identificou

transformações expressivas nas cabeceiras das bacias tributárias do rio Paraíba do Sul no Setor Sul de Volta Redonda, especialmente ao longo da última década, reforçando a relevância do recorte temporal adotado neste estudo.

Considerando esse conjunto de fatores, a bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão foi definida como área de análise em função de sua representatividade em relação à dinâmica evolutiva regional, aos processos de ocupação urbana e à diversidade de respostas geomorfológicas observadas nos sistemas fluviais. A pesquisa busca, assim, contribuir para a compreensão das transformações em curso nessa bacia, bem como para o desenvolvimento de procedimentos analíticos baseados em índices espectrais que possam complementar, em escala de bacia hidrográfica, a investigação dos impactos da urbanização sobre sistemas fluviais. Esses procedimentos apresentam potencial de aplicação em estudos futuros voltados a compartimentos colinosos do Sudeste brasileiro.

Espera-se, dessa forma, oferecer subsídios metodológicos e interpretativos para a identificação de trajetórias de transformação em bacias hidrográficas, contribuindo para o aprimoramento de procedimentos de avaliação que apoiem a gestão sustentável desses sistemas. Tais contribuições são particularmente relevantes no contexto da crise climática contemporânea, ao favorecer a compreensão da resiliência dos sistemas fluviais e das possibilidades de mitigação e reabilitação frente às alterações tecnogênicas associadas ao Antropoceno.

2. OBJETIVOS

O objetivo central da pesquisa é identificar e analisar tendências de mudanças na cobertura e no uso da terra em bacias hidrográficas afluentes do rio Paraíba do Sul, por meio da aplicação de índices espectrais derivados de sensoriamento remoto, de modo a subsidiar diagnósticos complementares voltados à detecção de trajetórias de transformação dos sistemas fluviais. Para isso, foram analisadas a bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão e a sub-bacia do Córrego do Curral-Leste, no período de 2014 a 2024, com base no processamento de 106 imagens do satélite Landsat 8.

Visando desenvolver uma avaliação mais adequada à escala de ocorrência das feições indicativas das condições geomorfológicas dos sistemas fluviais tributários do Rio Paraíba do Sul, optamos por realizar as análises tomando como recorte a bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão e uma de suas sub bacias. O período considerado

corresponde à última década (2014-2024), tendo em vista as significativas alterações tecnológicas identificadas na área dentro deste recorte temporal, conforme demonstrado por estudos anteriores.

Para alcançar o objetivo traçado, temos como objetivos específicos:

- Analisar as mudanças na cobertura e uso da terra para a bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão e na sub bacia do Córrego do Curral-Leste, tributário do Ribeirão Brandão localizado no Setor Sul do município de Volta Redonda;
- Realizar uma análise qualitativa e quantitativa em relação às mudanças na vegetação, corpos d'água e áreas urbanizadas para o período de 2014 a 2024, com base nos índices NDVI, NDWI e NDBI gerados a partir de imagens do Landsat 8, enfocando suas possíveis relações com processos e feições geomorfológicas identificados na sub bacia do Córrego do Curral-Leste.

3. ÁREA DE ESTUDO

3.1. Localização

A bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão está localizada em sua maior parte nos municípios de Barra Mansa e Volta Redonda, com pequenas porções nos municípios de Rio Claro e Piraí (Figura 1), todos localizados no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul fluminense. A bacia possui uma área de drenagem de aproximadamente 79 km², com um perímetro estimado em 55 km (Almeida, 2021), e o seu exutório no rio Paraíba do Sul está localizado nas proximidades da Usina Presidente Vargas da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), em Volta Redonda, que constitui um marco da industrialização na região e no Brasil.

Na região do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul fluminense, os maiores núcleos urbanos se encontram instalados sobre um relevo caracterizado por compartimentos colinosos inseridos entre as serras do Mar, ao sul, e da Mantiqueira, ao norte. Trata-se de um corredor estratégico entre os centros econômicos do Rio de Janeiro e São Paulo, em proximidade, ainda, com importantes zonas industriais do estado de Minas Gerais.

Dentre os principais afluentes do Ribeirão Brandão, destacam-se os córregos (

Figura 2):

- i. do Curral, no segmento sul da bacia, referido aqui como Córrego do Curral-Sul;
- ii. Brandãozinho, também conhecido como Cachoeirinha, localizado na porção oeste da bacia;
- iii. Serenon, posicionado na zona de cabeceira do Ribeirão Brandão, e;
- iv. um segundo afluente nomeado Córrego do Curral, situado na porção centro-leste da bacia, aqui denominado Córrego do Curral-Leste, a fim de diferenciá-lo do curso homônimo localizado a sul.

A bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão é cortada por importantes rodovias regionais e de ligação entre estas. Destacam-se a BR-116 (rodovia Presidente Dutra), a BR-393 (rodovia do Contorno) e a rodovia dos Metalúrgicos, que se configuram como importantes vetores de expansão urbana e industrial nos municípios de Barra Mansa e Volta Redonda, bem como de conexão entre os bairros mais afastados e a área central destas cidades.

Figura 1- Localização da bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão, afluente do Rio Paraíba do Sul em Volta Redonda (RJ).

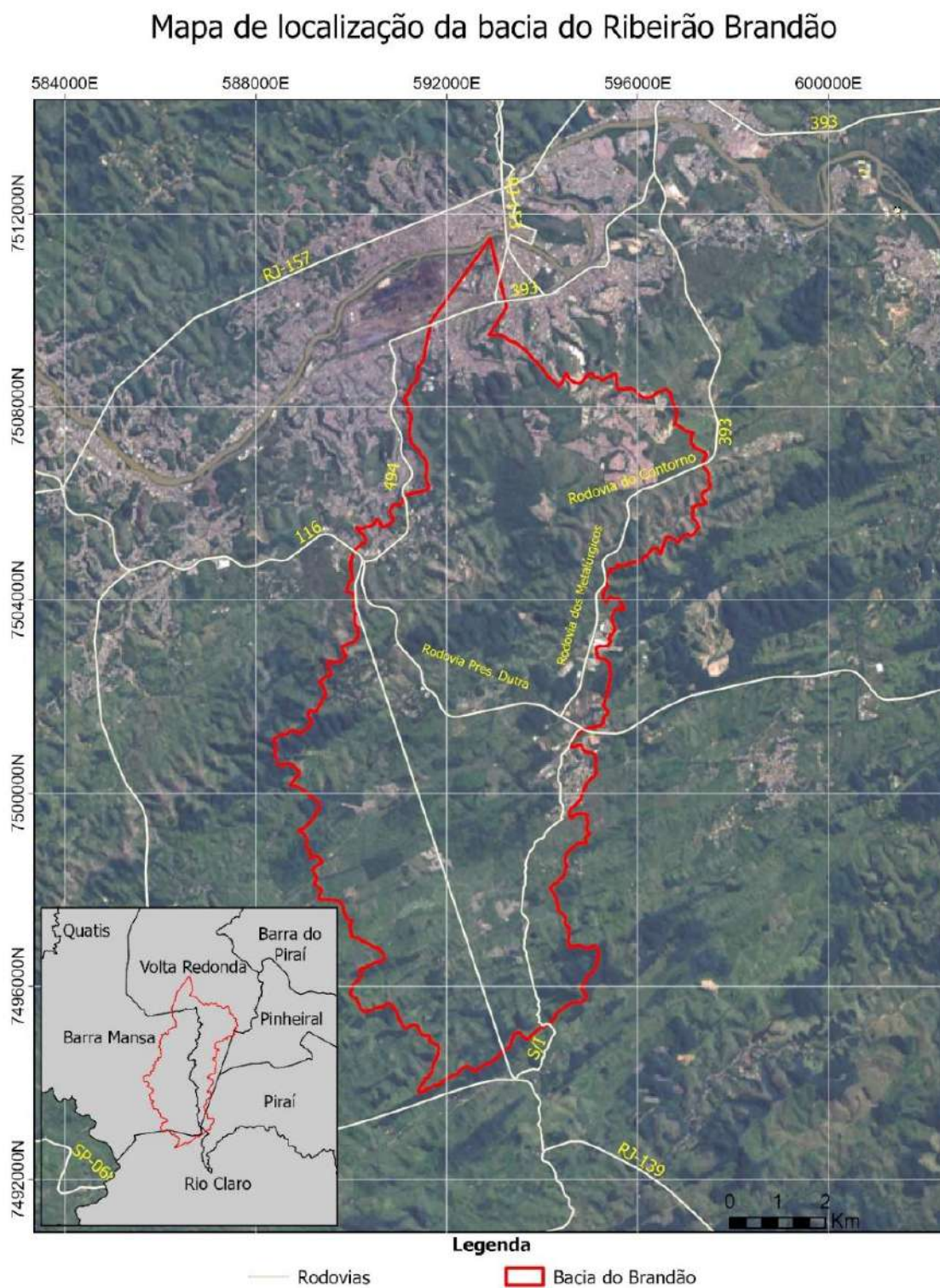
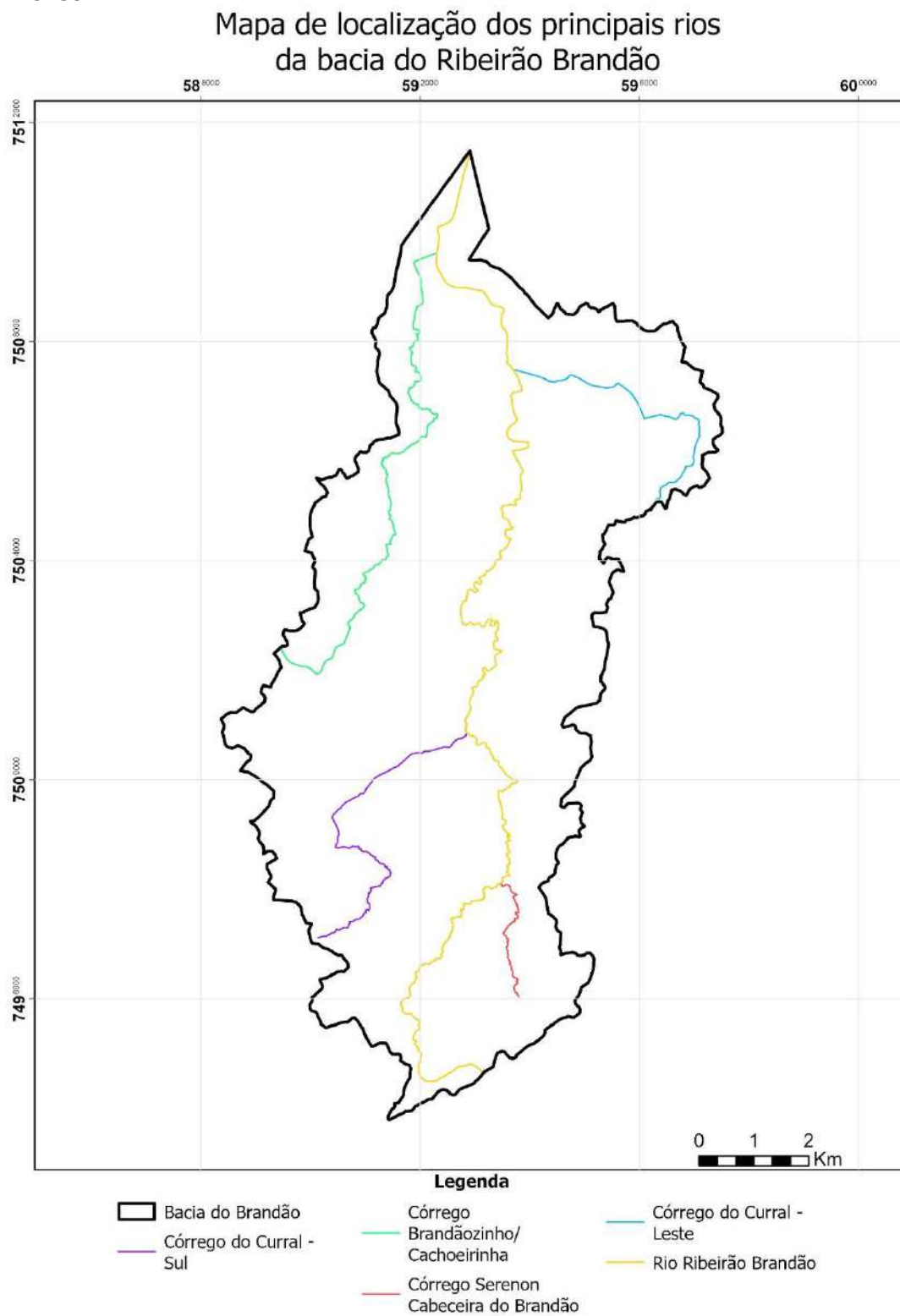


Figura 2- Localização dos principais canais coletores da rede fluvial da bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão, afluente do Rio Paraíba do Sul na região do Médio Vale do Paraíba do Sul fluminense.



3.2. Histórico de Ocupação e Uso da Terra

A região do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul vem sendo profundamente modificada pelas sucessivas atividades econômicas desenvolvidas ao longo de sua ocupação desde a colonização, as quais deixaram um expressivo passivo ambiental. Dentre os surtos econômicos que marcaram os séculos XVII, XVIII e XIX no Sudeste do Brasil, o cultivo do café foi, sem dúvida, o mais determinante para a transformação da paisagem regional. Sua passagem pelo Médio Vale do Paraíba do Sul provocou significativas mudanças, tanto no auge da produção — com a consolidação do povoamento e o estabelecimento de infraestrutura como a malha ferroviária — quanto na fase de esgotamento e abandono das lavouras. Na área considerada, a cafeicultura teve início por volta de 1820 e estendeu-se até 1890, atingindo seu apogeu entre 1850 e 1870, período em que municípios como Vassouras, Valença e Resende despontaram como importantes centros produtores no estado do Rio de Janeiro (Lima, 2004). A rápida expansão da fronteira agrícola cafeeira gerou a devastação da Mata Atlântica, levando à substituição quase completa da cobertura vegetal original em apenas duas décadas. Dean (1996) atribui essa velocidade de transformação, principalmente, à prática sistemática das queimadas como método de preparo do solo para o cultivo do café.

Segundo Dantas (1995), o avanço desordenado da cafeicultura gerou desequilíbrios acentuados na dinâmica hidrológica das encostas, acarretando instabilidade nos sistemas fluviais. Mello (1995) indica que a remoção da cobertura florestal primitiva acelerou os processos erosivos e incrementou a carga sedimentar nos canais fluviais resultando na formação de novas sequencias sedimentares nos fundos de vale. No entanto, esses depósitos não foram exclusivamente induzidos pela ação humana, pois as análises estratigráficas e as datações realizadas nos terraços fluviais inferiores apontam para a continuidade de um processo deposicional já em andamento.

Após o colapso dos cafezais da região, ficaram como marcas desse período histórico o “rastros da erosão”, oriundo do uso intensivo dos solos, com técnicas inadequadas de cultivo, que simboliza, também, a transição para um novo modelo produtivo nas áreas rurais: a pecuária leiteira. Esta nova fase econômica teve início entre 1890 e 1900, quando diversas propriedades rurais foram adquiridas por preços baixos, muitas vezes por famílias oriundas de Minas Gerais (Lima, 2004). Apesar de a cafeicultura e a pecuária terem sido decisivos na degradação dos solos e dos

recursos hídricos, foi a industrialização e urbanização, a partir da década de 1940, que elevaram esse quadro a patamares ainda mais críticos.

A construção da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) em Volta Redonda, iniciada em 1941 e concluída em 1946, marca assim uma nova etapa no processo de transformação das encostas, vales e sistemas fluviais da região. É importante destacar que a base dessa transformação já havia sido pavimentada anteriormente com a agricultura e a pecuária, uma vez que a usina foi instalada em um território dominado por atividades agropecuárias em declínio, cujos solos já haviam sido fragilizados e cujas dinâmicas fluviais estavam em processo de alteração.

Em Volta Redonda, análises sobre a evolução de feições erosivas e de movimentos gravitacionais de massa durante as décadas de 1960, 1970 e 1990 efetuadas por Pinto (2005) demonstram que tais processos estão fortemente associados à expansão urbana e periurbanas, destacando-se em especial no seu estudo os cortes de vias e edificações. No entanto, condicionantes locais, como as descontinuidades nos solos e no substrato geológico, a morfologia do terreno e o comportamento da drenagem, são também fatores determinantes, podendo ser agravados pela ocupação. Deve ser ainda destacado que a retomada de antigos canais erosivos por meio da instalação de redes de voçorocas remontantes configura-se como um processo de reajuste dos sistemas fluviais mais extenso e duradouro, conforme apontam Moura (1990) e Moura *et al.* (1991).

Portanto, a instalação da maior usina siderúrgica da América Latina não apenas intensificou as mudanças já em curso, como também consolidou uma nova fase de transformações ambientais e territoriais no Médio Vale do Paraíba do Sul. Os sistemas fluviais regionais vinham sendo modificados ao longo de uma escala de tempo mais longa, tendo a industrialização incorporado novas pressões que aceleram e complexificam ainda mais os processos de degradação ambiental.

3.3. Evolução Urbana de Volta Redonda

Devido à importância da implantação da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) para o processo de expansão urbano-industrial regional, apresentaremos de modo mais detalhado a trajetória da estruturação urbana de Volta Redonda.

Lima (2004), com base na análise de documentos históricos, registros fundiários e elementos da paisagem, como as sedes de antigas fazendas, destaca a presença de colonizadores já no século XVIII, motivados pela busca de metais

preciosos, dando origem à agricultura de subsistência, sendo a ocupação efetiva do território ocorrida nas primeiras décadas do século XIX, com a expansão das lavouras de café. Com o crescimento da produção cafeeira, formou-se ainda em meados do século XIX o núcleo original de ocupação, impulsionado pela atuação de importantes propriedades da região, como as fazendas Três Poços, Santa Cecília, São Thiago, Santa Thereza e Retiro. Posteriormente, a decadência do café levou à aquisição dessas terras por famílias mineiras, que passaram a desenvolver a pecuária leiteira em caráter extensivo, tendo o município de Barra Mansa tenha se destacado nessa atividade, chegando a ser considerada a maior bacia leiteira do país (Mello, 2022).

A principal inflexão no processo de ocupação ocorre no contexto do Estado Novo, sob Getúlio Vargas, quando o projeto de industrialização nacional ganha forma e simbolismo. A construção da CSN como parte dessa estratégia de modernização e urbanização do Brasil elevou Volta Redonda ao posto de cidade-monumento do nacionalismo trabalhista (Lopes, 1993), ao abrigar a usina símbolo da nova ordem produtiva.

Ainda que tenha predominado o cunho político na escolha da localização da planta industrial da CSN, contribuíram para a definição da sua localização a disponibilidade de energia elétrica, água abundante e ligação ferroviária, condições suficientes para viabilizar a siderurgia em larga escala, segundo Bedê (2004). Em 1942 se dá o início das obras da planta industrial e da vila operária, tendo sido a área escolhida, com aproximadamente 11 km², aterrada para abrigar os seis grandes setores da usina (coqueria, alto-forno, aciaria, laminação, oficinas e pátio de minérios), além de uma termelétrica, uma fundição e um sistema completo de captação e tratamento de água.

A construção da usina provocou um dos maiores fluxos migratórios internos do país, promovendo intenso crescimento populacional, como demonstra Mello (2022): a população urbana, que era de cerca de 3 mil habitantes nas primeiras décadas do século XX, saltou para 35.965 em 1950. A emancipação político-administrativa de Volta Redonda, então distrito de Barra Mansa, foi conquistada em 1954, tendo o crescimento urbano acompanhado a ampliação da estrutura da CSN e de seus bairros planejados, configurando a imagem da cidade-eldorado.

Essa expansão foi marcada por um dualismo espacial: a “cidade da empresa”, planejada, controlada e mantida pela CSN, e a “cidade velha”, composta por bairros como Niterói e Vila Mury, localizados a Norte do Paraíba do Sul. O modelo de cidade-

empresa implementou um padrão habitacional estratificado: engenheiros e técnicos ocupavam o bairro Laranjal; chefes intermediários, a Vila Santa Cecília; trabalhadores operários, bairros como Bela Vista, Conforto, Monte Castelo, Rústico e Sessenta (Bedê, 2004). Embora a empresa tenha promovido a construção de moradias para seus funcionários, o número de unidades não acompanhou o ritmo da demanda, resultando na proliferação de ocupações espontâneas no entorno das áreas controladas pela empresa, agravando os contrastes socioespaciais (Mello, 2022).

Figura 3: Registros fotográficos da evolução urbana de volta redonda.

- (A) Vista aérea do local de construção da usina siderúrgica da CSN, em 1941, à margem direita do rio Paraíba do Sul; observa-se o Ribeirão Brandão, a sul, e o Córrego Coqueiros, a norte, com canais meândricos.
- (B) Vista da usina em construção em 1943 a partir do laranjal onde se instalou o bairro homônimo.
- (C) Bairro operário Rústico, inaugurado em 1942, vendo-se ao fundo a CSN.
- (D) Bairro Conforto (1945).
- (E) Imagem do “eldorado”, símbolo do progresso, focando bairros operários e a usina (foto retirada de uma propaganda da época);
- (F) A cidade ordenada: bairros Laranjal (esquerda acima, bucólico, dos altos funcionários), Vila Santa Cecília (esquerda abaixo, para funcionários gabaritados e sede administrativa da usina), Monte Castelo (direita acima), Sessenta (direita abaixo);
- (G) Bairros Vila Santa Cecília e Bela Vista, em 1946;
- (H) Linha férrea (RFFSA) no eixo Leste-Oeste da cidade e bairros Vila Santa Cecília (à esquerda) e Nossa Senhora das Graças (direita);
- (I) Centro de Volta Redonda bem verticalizado no início da década de 1970;
- (J) Bairro criado em 1972, destaque para o prédio redondo e a Av. Paulo de Frontin.
- (K) Bairros entre a linha férrea e o rio Paraíba do Sul, em 1975 (visada de Norte para Sul): Aterrado (no centro à direita), Nossa Senhora das Graças (direita abaixo) e acima da linha férrea, Jardim Amália (esquerda), São Geraldo (no centro) e São João (direita);
- (L) Malha dos bairros construídos pela companhia;
- (M) Bairro Santa Rita do Zarur, com crescimento orgânico.



Fonte: Mello (2006). Créditos: Fotos (A), (B), (C), (D) e (F) retiradas de Bedê (2004); Fotos (G), (H), (I), (J), (K), (L) e (M) cedidas pelo Departamento de Fotografia da Prefeitura Municipal de Volta Redonda

Assim, a dinâmica industrial gerou a formação de novos bairros fora do controle da companhia, também ao longo das rodovias BR-393 e Presidente Dutra, e ao longo da linha férrea, conformando o processo de conurbação com Barra Mansa. Enquanto bairros como Conforto, Eucaliptal e Minerlândia surgiam nos anos 1950, os anos 1970 e 1980 testemunharam o surgimento de Roma I e II, além de ocupações periféricas em áreas com infraestrutura precária.

A vigilância territorial da CSN se concentrava nos bairros sob seu domínio, exercendo controle inclusive sobre fachadas e usos do solo. O bairro Conforto, por exemplo, foi construído com imóveis amplos, baixa densidade, boa infraestrutura e aluguéis acessíveis, destinados aos funcionários intermediários. Ruas como as de São Lucas, Eucaliptal e Ponte Alta derivam dessa malha planejada. Já os bairros operários, como Monte Castelo e Sessenta, permaneceram por anos sem pavimentação e sem equipamentos públicos relevantes, diferentemente dos bairros elitizados (Castro, 2004).

A partir de 1968, a CSN transfere à prefeitura os equipamentos urbanos coletivos, como ruas, praças e sistemas de abastecimento, marcando o início do processo de desvinculação entre empresa e cidade, ou a ruptura do modelo paternalista conforme aponta (Piquet, 1998), dando lugar a novas formas de articulação entre capital, trabalho e espaço urbano, em que o crescimento urbano passa a seguir lógicas mais difusas e desiguais.

Nas décadas de 1980 e 1990, a ocupação de áreas públicas e terrenos pertencentes à CSN torna-se uma das principais frentes de expansão urbana. Estimulados por movimentos populares, com destaque para a atuação das Comissões Eclesiais da Igreja Católica, formaram-se 148 núcleos de posse, muitos deles no entorno dos bairros planejados, que passaram em 1994 a integrar o planejamento participativo do município, com a criação do FURBAN e a adoção do orçamento participativo.

Geograficamente, a cidade se expandiu inicialmente ao longo da calha do Paraíba do Sul, sobre planícies e terraços fluviais, base da implantação da CSN e dos primeiros bairros. A partir da década de 1970, a expansão avança para Norte e Leste, e posteriormente para Sul, ocupando morros e colinas sobre substrato cristalino e das bacias sedimentares, sujeitas a processos erosivos e instabilidade de encostas, como será apresentado a seguir. Os bairros Santa Cruz e Santa Rita do Zarur, por exemplo, formaram-se em terraços da bacia do rio Santa Rita, enquanto outros, como Vila

Brasília, ocuparam encostas mais dissecadas. No Setor Sul, bairros como Jardim Belvedere e Casa de Pedra foram implantados em terrenos mais amplos e de topografia menos acidentada, inseridos no Gráben de Casa de Pedra (Mello, 2006).

Embora os bairros planejados da cidade apresentem melhores condições urbanísticas, não ficaram imunes a enchentes, desmoronamentos e aos impactos ambientais decorrentes da expansão urbana. Segundo Castro (2004), o planejamento urbano de Volta Redonda esteve voltado prioritariamente às necessidades da CSN, como demonstrado no Plano Estrutural de Desenvolvimento Integrado (PEDI-VR), da década de 1970. A retificação, dragagem e canalização de cursos d'água não resolveram os problemas de inundações e assoreamento, e, por vezes, os agravaram. Mesmo nos bairros planejados, a densidade construtiva e as soluções técnicas adotadas impuseram modificações significativas no comportamento dos canais (Mello, 2006; 2022).

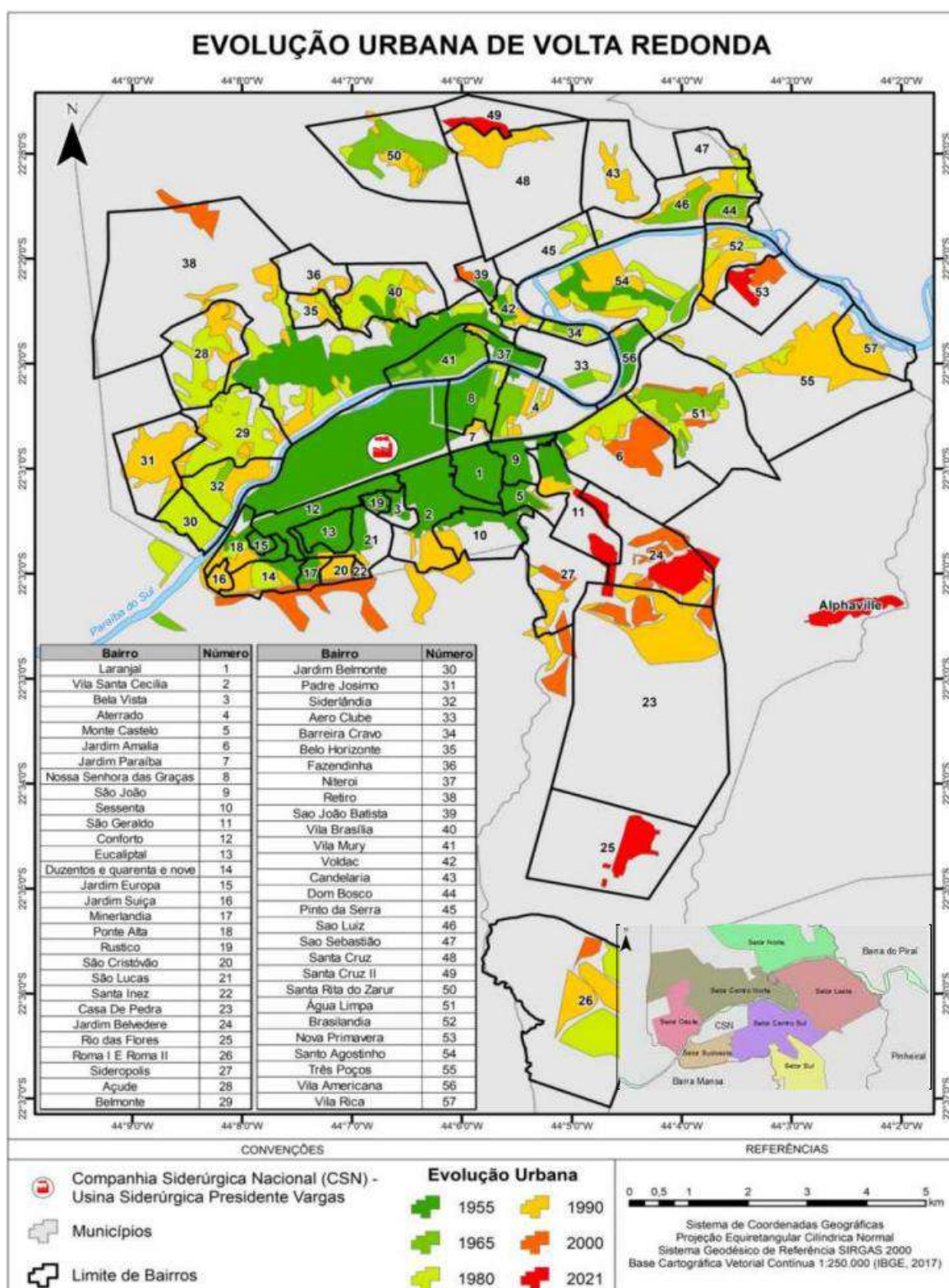
A evolução urbana representada na Figura 3 dialoga diretamente com a narrativa histórica da formação de Volta Redonda. A partir da implantação da CSN, na década de 1940, observa-se a consolidação de um núcleo urbano fortemente ancorado na usina e em seus bairros planejados, implantados sobre as planícies e terraços fluviais do vale do Paraíba do Sul. As manchas em verde e amarelo mais antigas indicam justamente essa fase de urbanização concentrada, associada ao modelo de “cidade-empresa”, em que a CSN planejava, controlava e mantinha as áreas sob sua influência direta, enquanto a “cidade velha” se consolidava na margem oposta, em bairros como Niterói e Vila Mury (Lima, 2004; Bedê, 2004; Mello, 2022). Esse primeiro momento traduz o salto demográfico descrito por Mello (2022), em que a população urbana passa de poucos milhares de habitantes para dezenas de milhares em poucas décadas, acompanhando a estruturação industrial.

À medida que o tempo avança, as diferentes fases de expansão indicadas na legenda da Figura 3 revelam a ruptura progressiva do modelo estritamente empresarial e a difusão do tecido urbano para além dos limites diretamente controlados pela companhia. A expansão ao longo das rodovias BR-393 e Presidente Dutra, bem como da linha férrea, favorece a emergência de novos bairros operários e periféricos, muitos deles resultantes de processos de ocupação espontânea de terras públicas e áreas da própria CSN, como relatado por Mello (2006, 2022) e Castro (2004). A cartografia da evolução urbana mostra o avanço das manchas construídas em direção ao Norte, Leste e Sul, ocupando terraços fluviais de afluentes como o rio

Santa Rita e, posteriormente, encostas e colinas mais dissecadas, em consonância com a descrição de bairros como Santa Cruz, Santa Rita do Zarur, Vila Brasília, Jardim Belvedere e Casa de Pedra, implantados em contextos geomorfológicos cada vez mais vulneráveis a processos erosivos e instabilidades de encosta (Mello, 2022).

Ocorre ainda um aumento significativo da extensão de canais retificados, canalizados e tubulados, que ultrapassa 50 km no período considerado (Mello, 2022), acompanhando as fases de maior adensamento urbano identificadas para as décadas de 1960 a 1990 e a posterior proliferação de núcleos de posse nas periferias (Piquet, 1998). As intervenções nos cursos d'água – motivadas por obras viárias, drenagem urbana e ocupação de várzeas – materializam o planejamento voltado prioritariamente às necessidades da CSN, e ajudam a explicar por que, mesmo nos bairros planejados, persistem problemas de enchentes e assoreamento nos canais fluviais (Castro, 2004). Assim, Mello (2022) identifica a passagem de uma urbanização concentrada e controlada pela empresa para um padrão de expansão difuso, socio espacialmente desigual e ambientalmente impactante, que conforma o quadro problemático a ser diagnosticado na bacia do Ribeirão Brandão.

Figura 4: Evolução urbana de Volta Redonda com base em: mapeamentos sobre a extensão das áreas urbanas nos períodos até 1955, 1956/1965, 1965/1980 e 1980/1990 e base cartográfica do IBGE.



Fonte: Mello (2022).

3.4. Arcabouço Geológico e Geomorfológico

O Médio Vale do Rio Paraíba do Sul apresenta uma diversidade de formações geológicas relacionadas tanto ao embasamento cristalino pré-cambriano como às sequências sedimentares do Paleógeno, Neógeno e Quaternário, compondo um mosaico litoestrutural que influencia diretamente os padrões do relevo e da rede de drenagem e (Figura 5). A bacia do Ribeirão Brandão se insere neste contexto, tendo o arcabouço geológico um papel central na compreensão da sua evolução geomorfológica e dinâmica ambiental.

O embasamento cristalino, composto predominantemente por rochas gnáissicas e granitóides, predomina no alto e médio curso da bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão. Essas formações geológicas representam a base estrutural sobre a qual os processos geomorfológicos atuam, determinando características como a declividade das encostas e a resistência à erosão, além do padrão de drenagem em áreas de maior elevação, onde os rios tendem a se alinhar a estruturas geológicas pré-existent (Negrão, 2015).

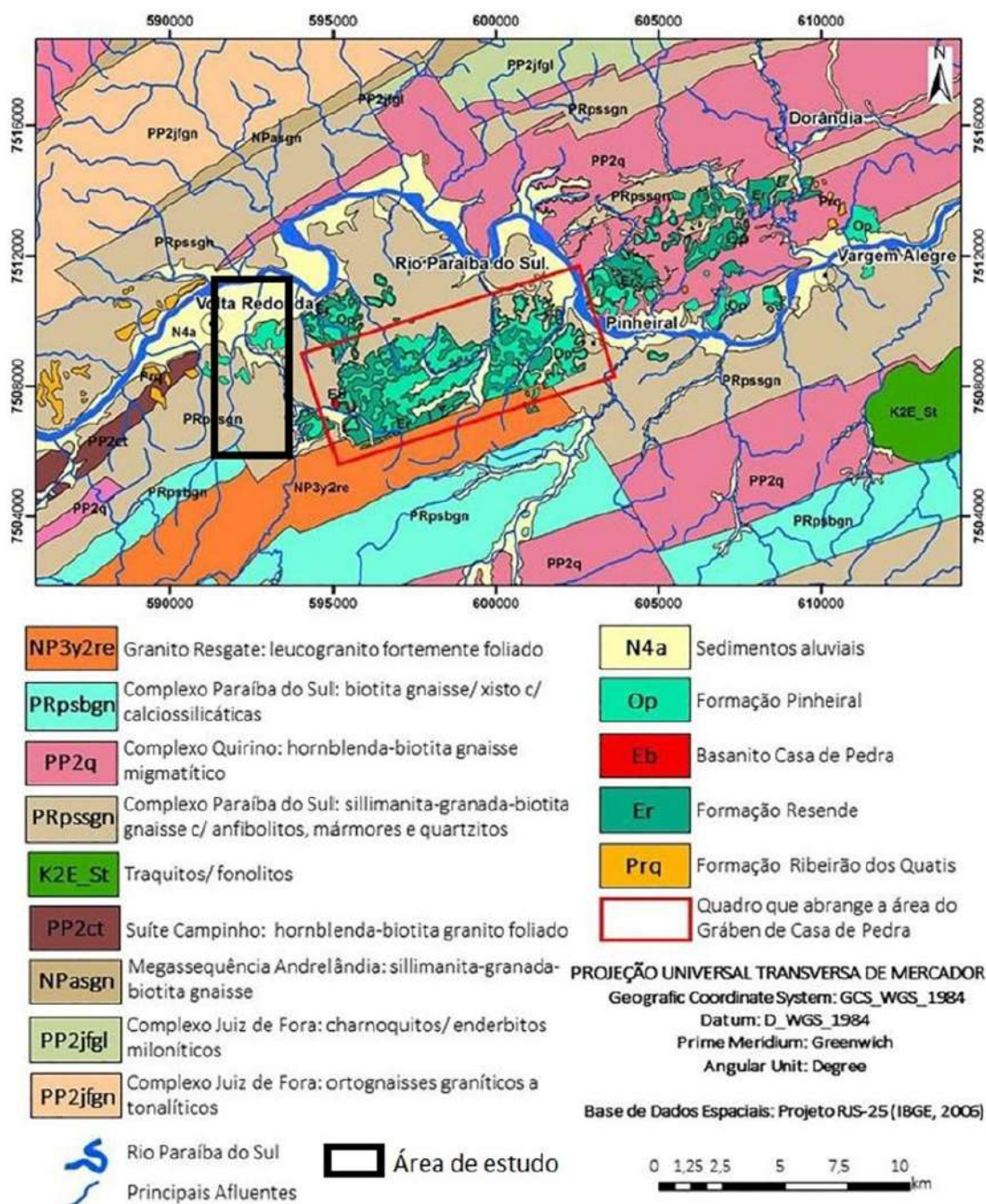
Em trechos dos médio e baixo cursos da bacia observa-se a ocorrência de depósitos neogênicos do Gráben Casa de Pedra e da Bacia Sedimentar de Volta Redonda. Esses depósitos incluem conglomerados, arenitos e depósitos finos, como argilitos, que evidenciam a dinâmica deposicional de antigas bacias sedimentares lacustres e fluviais (Negrão, 2015), as quais, de maior suscetibilidade à incisão fluvial e lateral, desempenham papel importante na configuração das planícies de inundação e na dinâmica atual dos canais fluviais.

O Gráben Casa de Pedra é uma das estruturas geológicas mais marcantes na área, constituindo um relevo de depressão tectônica delimitada por falhas normais. Este gráben apresenta pacotes sedimentares que registram eventos deposicionais e movimentos neotectônicos, sendo um indicador importante da evolução geológica e paleoambiental da região (Negrão, 2015).

As falhas normais que delimitam o Gráben Casa de Pedra e outras estruturas tectônicas regionais condicionam a orientação dos canais e a abertura dos vales fluviais, criando um padrão estrutural bem definido. Os lineamentos regionais NE-SW refletem tensões tectônicas do final do Pré-Cambriano e reativações do Cenozoico que controlam a orientação dos principais compartimentos do relevo e diversos trechos dos tributários e do curso do rio principal. A tectônica ativa regional também

afeta a dinâmica fluvial, seja por meio de falhas, fraturas e lineamentos que orientam tanto a rede de drenagem quanto a dissecação das encostas (Negrao, 2015).

Figura 5- Geologia da região que abrange o Médio Vale do Rio Paraíba do Sul fluminense, onde se insere bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão. Estão destacados: em preto, a localização dos médio e baixo cursos da bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão, que abrange bairros da área central e centro-sul da cidade; em vermelho, a localização do Gráben Casa de Pedra, que abarca a área da sub-bacia Córrego do Curral-Leste.



Fonte: Adaptado de Santos (2016) e Negrao (2015).

Estruturas com orientação N-S e NW-SE estão muito presentes no condicionamento da orientação da rede de drenagem principal e secundária da bacia. As falhas também influenciam a dissecação das encostas e a formação de vales em forma de "V", que predominam nos compartimentos mais dissecados. A neotectônica tem papel relevante nos processos geomorfológicos ao criar zonas de instabilidade em encostas, alterar a organização da rede de drenagem através do encaixamento de canais fluviais e da formação de capturas fluviais, e formar depressões locais onde podem ser acumulados os depósitos fluviais (Negrão, 2015).

Com relação às sequências sedimentares de idade quaternária, os depósitos holocênicos associados ao evento Manso (Mello, 1992) constituem um marco importante na geologia recente da bacia hidrográfica. Esses depósitos são compostos por camadas tabulares de sedimentos finos, como argilas e siltes, que preenchem os fundos de vale, que se alternam com areias maciças em direção às reentrâncias de cabeceiras de drenagem em anfiteatro, e representam importante registro de eventos erosivos e deposicionais relacionados ao Evento Manso (Mello, 1992; Moura; Mello, 1991), vinculado a alterações climáticas e à neotectônica no Holoceno. Os pacotes sedimentares da Aloformação Manso formam as feições de rampas de alúvio-colúvio, que têm continuidade topográfica com o nível de terraço fluvial mais alto na área (Terraço 1).

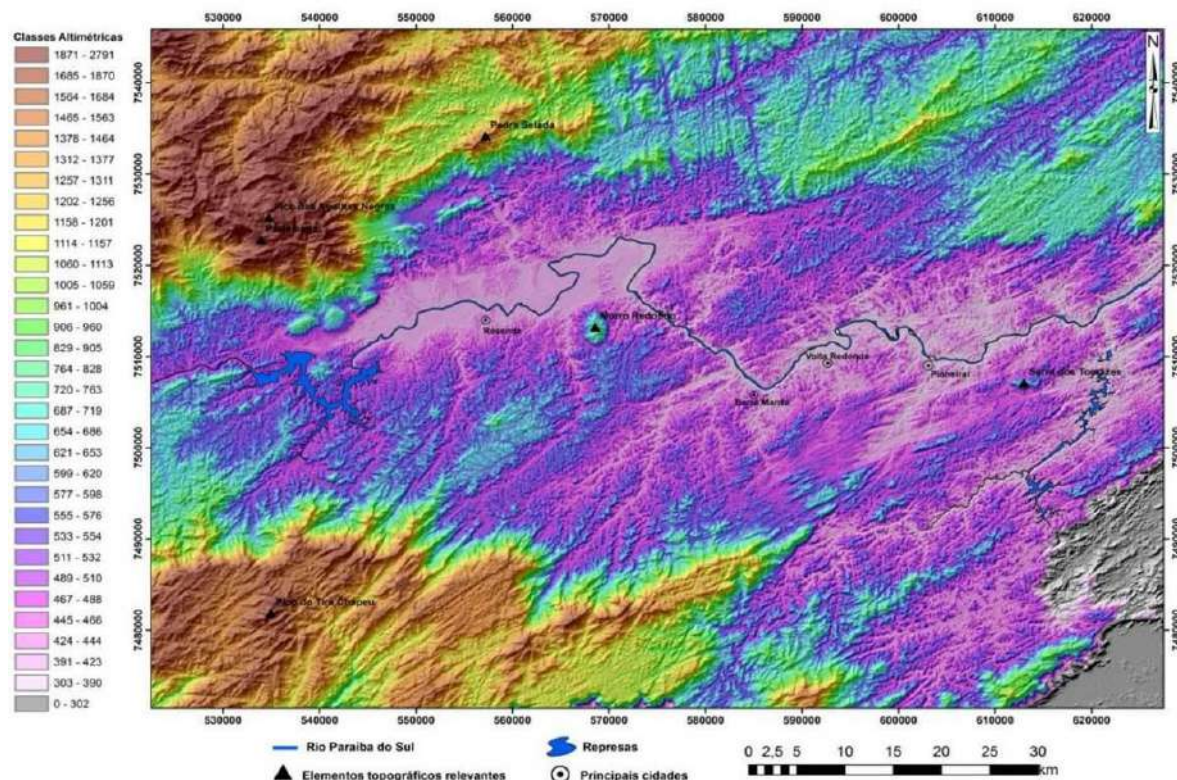
Outro aspecto relevante é a presença de coberturas coluviais formando os complexos de rampas de colúvio, desenvolvidos principalmente em zonas de média e baixa encostas, que indicam eventos deposicionais recentes associados a alterações hidrológicas e climáticas do Holoceno (Moura; Mello, 1991; Negrão, 2015). Regionalmente, registra-se ainda a presença de coberturas coluviais pleistocênicas preservadas aflorando em interflúvios e divisores de drenagem de conformação suave, conforme aponta (Peixoto, 2002). Estes materiais apresentam diferentes graus de erodibilidade, como identificaram estudos realizados por Salgado (Salgado, 1996) e (Peixoto, 1993)

Estas sucessões sedimentares e morfologias possuem ampla distribuição espacial na Depressão Tectônica do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (Figura 6), onde se insere a bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão, que apresenta compartimentos de colinas, morros e serras/degraus reafeiçoados (Figura 7). A orientação geral NE-SW dos compartimentos mais elevados no interior da depressão tectônica, e de muitos trechos dos vales dos canais coletores, enquanto outros trechos

de vales fluviais mostram orientação N-S e NW-SE, neste último caso especialmente quando atravessam compartimentos elevados de direção NE-SW. Os compartimentos colinosos nessa região apresentam altitudes entre 650 e 450m, com níveis topográficos controlados pelas litoestruturas ou associados a níveis de base locais (Silva 2002; Peixoto, 2002).

É frequente a ocorrência de trechos em que as encostas se tornam mais dissecadas e os vales confinados, especialmente quando os canais coletores cortam compartimentos mais elevados. O Ribeirão Brandão, por exemplo, apresenta um curso principal com orientação predominante S-N, atravessando compartimentos geomorfológicos de direção geral NE-SW. Nos trechos em que os fundos de vale se tornam mais amplos, há maior desenvolvimento de planícies de inundação e terraços fluviais, como pode ser visualizado na área do Gráben Casa de Pedra (Figura 7).

Figura 6 - Mapa hipsométrico do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul fluminense, evidenciando a depressão tectônica onde se inserem os sistemas fluviais tributários do rio Paraíba do Sul.



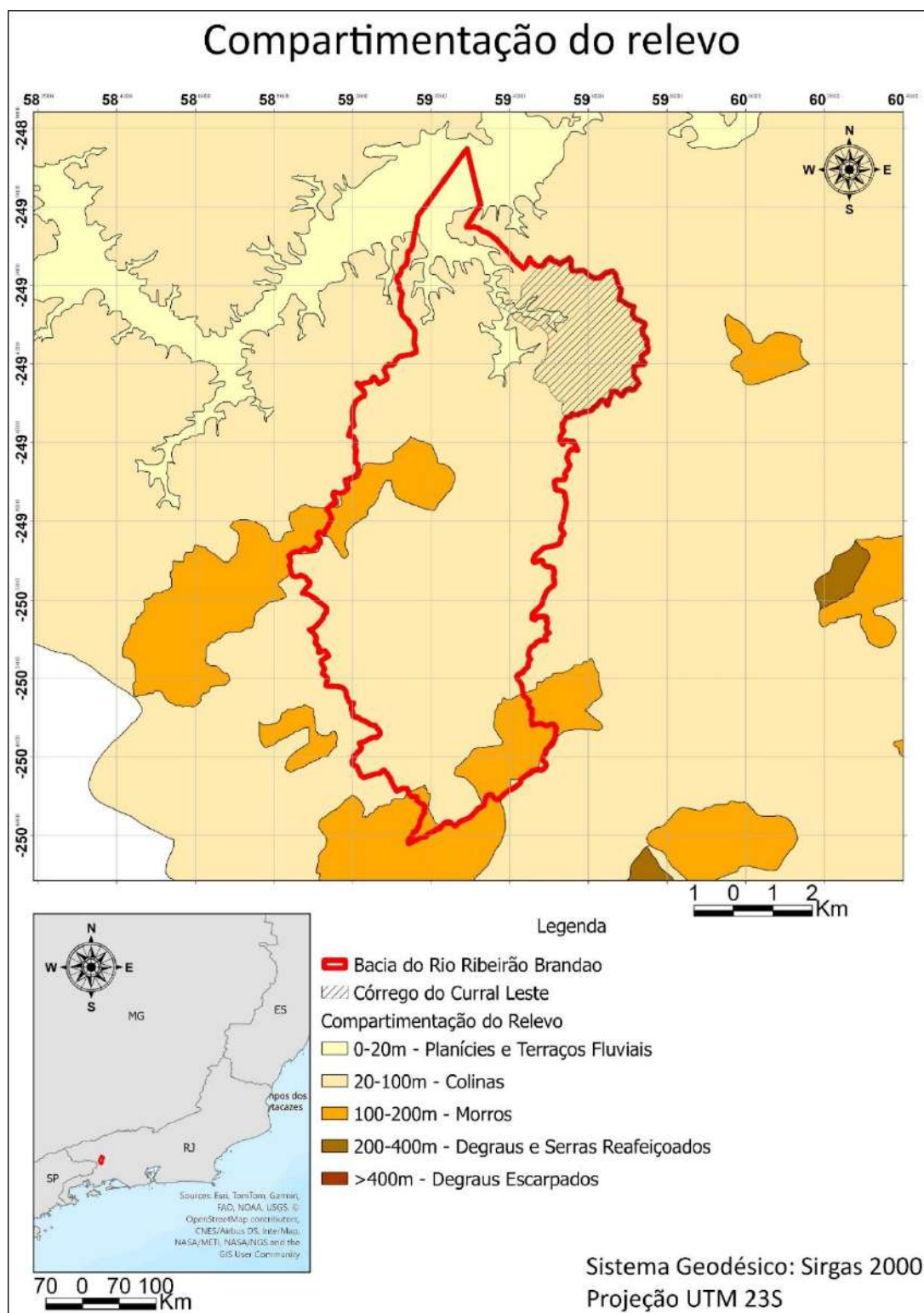
Fonte: Negrão (2015).

As cabeceiras de drenagem em anfiteatro destacam-se como feições geomorfológicas de grande importância no relevo regional e local, pois desempenham papel central na formação das redes de drenagem regionais (Moura *et al.*, 1991), além de estarem associadas ao desenvolvimento de processos erosivos lineares, como

ravinas e voçorocas desconectadas e voçorocas conectadas à rede de drenagem. Sua morfologia reflete tanto o esculpimento por processos erosivos, movimentos gravitacionais de massa e processos deposicionais, quanto a influência dos controles estruturais subjacentes.

Um aspecto notável na morfologia das bacias hidrográficas regionais são as feições associadas ao entulhamento dos vales fluviais e cabeceiras de drenagem associados ao Evento Manso, de idade holocênica. As rampas de alúvio-colúvio e o nível mais elevado de terraços fluviais configuram extensas superfícies deposicionais formadas durante o Holoceno inicial a médio (Moura *et al.*, 1991; Moura; Mello, 1991; Mello, 1992), marcando a paisagem regional e especialmente em alguns trechos das bacias hidrográficas da área em estudo (Figura 8).

Figura 7 – Principais compartimentos geomorfológicos da área do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul fluminense onde se insere a bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão, delimitada em vermelho.



Fonte: Silva, 2002.

Figura 8 - Visualização das feições de rampas de alúvio-colúvio em continuidade topográfica com o nível de terraço fluvial superior (T1) no Gráben Casa de Pedra, Volta Redonda (RJ).



Foto: Leandra Castro (2022).

Conforme análise realizada por Almeida (2021), predominam, ao longo dos coletores da bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão, canais controlados por encostas íngremes ou terraços fluviais, ou ainda por aterros, rodovias e edificações nas áreas urbanas, tipificados, portanto, como confinados ou parcialmente confinados. Essas características geomorfológicas limitam a capacidade de ajuste lateral dos rios e influenciam diretamente os padrões de transporte e deposição de sedimentos.

A expansão urbana tem contribuído para aceleração dos processos erosivos com a exposição das coberturas superficiais e a selagem dos solos (Figura 9 e Figura 10). A ocupação urbana nas cabeceiras de drenagem em anfiteatro tende a intensificar os processos erosivos nas encostas, nos *hollows* e nas margens dos canais fluviais, resultando na degradação das funções dessas importantes feições geomorfológicas (Mello, 2006; Figueiredo, 2024).

Figura 9 - Exposição de coberturas superficiais em encostas e aterramento de fundo de vale em uma cabeceira de drenagem devido a práticas de terraplanagem para implantação de loteamentos do Setor Sul de Volta Redonda (RJ), em área de divisa com o município de Pinheiral (RJ). Em segundo plano, observa-se os diferentes compartimentos de colinas, morros e degraus reafeiçoados, que caracterizam o relevo regional.



Foto: Lucas Almeida (2022).

Figura 10 - (A) Formação de novas superfícies e (B) exposição de coberturas superficiais na base de encostas e no *hollow* de Cabeceiras de Drenagem em Anfiteatro, devido à escavação para retirada de materiais de empréstimo pra obras. Em (B) observa-se também a formação de sulcos erosivos e ravinas.



Foto: Leandra Castro (2024).

3.5. Características Climáticas

A região do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul é caracterizada por um clima tropical com estações bem definidas, marcado por verões úmidos e invernos relativamente secos. A precipitação anual média varia em torno de 1.300 mm, com uma distribuição sazonal que afeta diretamente os processos hidrológicos e geomorfológicos da região (Moura *et al.*, 1991; Mello, 2006). O fator climático é, portanto, determinante para a dinâmica de erosão e transporte de sedimentos nas bacias hidrográficas.

Uma característica importante da região são as chuvas orográficas, em função das serras do Mar e Mantiqueira, sendo os maiores volumes de chuvas verificados em dezembro, janeiro e fevereiro, enquanto junho, julho e agosto são os meses menos chuvosos (Del Pozo, 2011). O período de novembro a março é associado à atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), um dos principais mecanismos que trazem umidade para o Sudeste do Brasil (INMET, 2023). As chuvas intensas nesse período provocam enchentes e aceleram os processos de erosão em áreas de encosta e margens de canais.

A primavera, de setembro a novembro, marca o início do aumento das chuvas na região, com volumes que preparam o terreno para o regime intensivo do verão. As precipitações mais regulares nesta estação promovem o início do reabastecimento hídrico nos solos e sistemas fluviais, reduzindo parcialmente os impactos da seca do inverno. Essa sazonalidade influencia os padrões de recarga dos aquíferos e a conectividade hidrológica na bacia.

Além da influência das estações, a topografia regional desempenha um papel fundamental na modulação do clima local. A Serra do Mar ao sul cria um efeito orográfico que intensifica as chuvas em áreas de maior altitude.

Eventos climáticos extremos, como tempestades convectivas e chuvas intensas associadas a frentes frias, são comuns na região durante o verão. Esses episódios podem causar inundações rápidas, desencadeamento e ampliação dos processos erosivos em larga escala, alterando a morfologia dos canais fluviais e das planícies de inundação (Mello, 2006).

3.6. Cobertura vegetal e uso da terra

A cobertura vegetal da bacia do Ribeirão Brandão é marcada por fragmentos florestais intercalados com áreas urbanas, de pastagem e agricultura. Esse mosaico

é reflexo das transformações ocorridas no uso da terra, marcadas pela devastação da Mata Atlântica para uso agrícola, bem como durante as últimas décadas com a expansão urbana e industrial.

A Mata Atlântica cobria grande parte da região, desempenhando um papel crucial na regulação hídrica, no controle da erosão e na manutenção da biodiversidade regional. Atualmente, os remanescentes florestais estão concentrados principalmente em áreas de difícil acesso dos compartimentos serranos, onde a topografia acentuada dificultou a ocupação humana e a substituição da vegetação original. Nos compartimentos colinosos da bacia há um único importante remanescente - a Floresta da Cicuta -, hoje uma Área de Relevante Interesse Ecológico (ARIE) localizada no setor médio da bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão, na divisa com o município de Barra Mansa (RJ).

As demais áreas florestadas existentes, apesar de secundárias, apresentam grande importância ecológica, funcionando como refúgios para a fauna local e corredores ecológicos que conectam fragmentos isolados. No entanto, a fragmentação dessas florestas devido à urbanização e às práticas agrícolas têm reduzido significativamente sua funcionalidade ecológica e a conectividade entre os habitats, conforme já apontado por (Del Pozo, 2011).

4. BASE CONCEITUAL

4.1. Dinâmica dos sistemas fluviais

Conforme já apontado, na bacia do Ribeirão Brandão, a urbanização produziu alterações tecnogênicas marcantes nas redes de drenagem, destacando-se, segundo Almeida, Mello e Peixoto (2022), a retificação de canais e a concretagem das margens fluviais. O isolamento dos ambientes hídricos e podem produzir ter impactos também na fragmentação do sistema fluvial. De acordo com Wheaton *et al.* (2015), a fragmentação reduz a conectividade longitudinal e lateral dos rios, comprometendo sua capacidade de transportar sedimentos e nutrientes, agravando, portanto, a degradação das suas funções e limitando as possibilidades de recuperação natural.

A conectividade hidrológica é um elemento fundamental para a manutenção da funcionalidade ecológica dos sistemas fluviais. De acordo com Brierley e Fryirs (2005), a conectividade hidrológica refere-se à continuidade do fluxo de água, sedimentos e nutrientes dentro de uma bacia hidrográfica, possibilitando a interação dinâmica entre diferentes segmentos do sistema fluvial. A perda de conectividade hidrológica também

afeta a biodiversidade aquática, uma vez que espécies dependentes de *habitats* interligados enfrentam dificuldades para se deslocar e reproduzir. Além disso, a fragmentação dos *habitats* fluviais aumenta a vulnerabilidade a eventos climáticos extremos, como enchentes e secas prolongadas, que vêm se tornando mais frequentes com as mudanças climáticas.

Outro impacto significativo da perda de conectividade hidrológica é a intensificação de processos erosivos nas margens dos rios. Pelech e Peixoto (2020) destacam que a desconexão entre os canais fluviais e suas planícies aluviais limita a capacidade de os rios acomodarem fluxos excessivos de água durante períodos de chuva intensa, agravando os riscos de enchentes e reduzindo a capacidade de recarga dos aquíferos. Wheaton *et al.* (2015) explicam que a desconexão entre o canal e sua planície aluvial resulta em fluxos de alta energia que aceleram a erosão e comprometem a estabilidade das margens.

Assim, estudos como os de Wheaton *et al.* (2015) mostram que a conectividade hidrológica é um indicador-chave da saúde de um sistema fluvial (Pelech; Peixoto, 2020), determinando as condições geomórficas dos rios, conforme concepção apresentada no arcabouço conceitual dos Estilos de Rios. A retificação de canais, prática frequente em áreas urbanizadas, reduz a complexidade estrutural dos canais e compromete sua capacidade de dissipar energia durante eventos de cheia, resultando em fluxos de alta energia que aumentam a erosão das margens e a sedimentação nos trechos a jusante dos segmentos retificados.

Considerando a importância do arcabouço conceitual dos Estilos de Rios (River Styles®, conforme Brierley; Fryirs, 2005) para uma melhor apreensão da dinâmica fluvial em uma abordagem multiescalar, apresentaremos brevemente a seguir os diferentes elementos e análises que o compõem, que são reunidos em estágios dentro da abordagem dos autores.

4.1.1. Caráter e Comportamento Fluviais

Compreender como os sistemas fluviais estão configurados e como respondem a processos naturais e antropogênicos constitui o primeiro passo da metodologia River Styles®. Ao identificar os diferentes estilos fluviais presentes em uma bacia hidrográfica e descrever os fatores que controlam sua morfologia e comportamento, se estabelece as bases para as análises seguintes. Esta construção envolve: (a) análise dos controles geológicos e geomorfológicos que moldam os sistemas fluviais;

(b) segmentação do canal em unidades homogêneas baseadas em atributos geomorfológicos; e (c) identificação e descrição dos estilos fluviais. Esses passos são complementados por avaliações de campo, análise de imagens e pesquisa de dados históricos.

Os controles geológicos estabelecem a base para a individualização de estilos fluviais, ainda que possam ser amplamente modificados por atividades humanas. A segmentação dos canais é um passo crucial para identificar trechos homogêneos dentro da bacia hidrográfica, e envolve a análise de atributos como: gradiente do canal, conectividade lateral e longitudinal, presença de terraços ou planícies de inundação, tipos de vegetação ripária e dinâmica sedimentar. A identificação dos estilos é o produto da segmentação e envolve a análise detalhada de cada trecho do canal, com base em seus atributos geomorfológicos e dinâmicos.

4.1.2. Condição Geomorfológica

A compreensão da condição atual de cada segmento fluvial em relação a um estado geomorfológico de referência, considerando as alterações que ocorreram ao longo do tempo e a capacidade do sistema em manter seus processos geomorfológicos essenciais (Brierley; Fryirs, 2005) constitui outro elemento fundamental desta abordagem. Ao se interpretar e avaliar as mudanças geomorfológicas nos estilos fluviais identificados, determina-se se essas alterações são reversíveis ou irreversíveis e se estabelece uma referência que sirva como base para análises futuras e propostas de manejo.

O ponto de partida, assim, é a definição de uma condição de referência, que representa o estado geomorfológico considerado ideal ou funcional para cada estilo fluvial. Essa referência pode ser baseada em registros históricos, análises de segmentos não impactados ou modelos que descrevam a funcionalidade esperada de sistemas fluviais em condições naturais (Brierley; Fryirs, 2005).

Um dos aspectos centrais desta etapa é determinar se as mudanças geomorfológicas observadas são reversíveis ou irreversíveis. Alterações irreversíveis ocorrem quando o sistema não pode retornar à condição de referência devido a impactos permanentes, como mudanças no uso da terra, perda de *habitats* ou construção de estruturas rígidas (Brierley; Fryirs, 2005). As alterações geomorfológicas são identificadas por meio de análises comparativas entre o estado atual e a condição de referência, e incluem: mudanças na largura, profundidade e

sinuosidade do canal; transformações na conectividade lateral e longitudinal; alterações nos padrões de sedimentação e erosão.

Com base nas análises realizadas, cada segmento fluvial é classificado em uma das três categorias de condição geomorfológica definidas por (Brierley; Fryirs, 2005):

- a) Bom estado geomorfológico: mantêm suas características funcionais próximas à condição de referência, com alterações mínimas e reversíveis;
- b) Estado moderado: apresentam alterações significativas, mas com potencial para recuperação parcial ou completa;
- c) Estado pobre ou degradado: apresentam alterações irreversíveis, em que as funções geomorfológicas foram comprometidas

4.1.3. Potencial de Recuperação do Sistema Fluvial

A integração do entendimento da condição geomorfológica com a identificação de fatores limitantes e oportunidades para a recuperação define a avaliação da capacidade de cada segmento fluvial de se ajustar e retornar a um estado funcional diante de mudanças ou intervenções (Brierley; Fryirs, 2005). A capacidade de ajuste de um rio refere-se à sua habilidade de responder a perturbações sem comprometer suas funções geomorfológicas. Essa análise é essencial para determinar quais trechos possuem maior potencial de recuperação e quais requerem intervenções mais intensivas.

A análise da trajetória de mudança é o primeiro passo na avaliação do potencial de recuperação. Essa análise considera o histórico de alterações geomorfológicas e os padrões atuais de ajuste dos rios para prever como cada segmento pode evoluir sob condições de manejo atuais ou modificadas (Brierley; Fryirs, 2005). Essa análise também permite identificar áreas onde intervenções específicas, como remoção de barreiras ou revegetação ripária, podem alterar positivamente a trajetória de mudança.

A avaliação do potencial de recuperação exige, assim, a identificação de fatores que limitam ou facilitam a recuperação geomorfológica. Esses fatores incluem:

- a) Barreiras físicas: estruturas rígidas, como muros de contenção e canais concretados, são os principais limitantes em trechos urbanos;
- b) Alterações no regime hidrológico: a impermeabilização do solo e o aumento do escoamento superficial em áreas urbanas reduzem a capacidade de infiltração e alteram os padrões de fluxo;

- c) Conectividade lateral e longitudinal: segmentos com conectividade preservada apresentam maior potencial de recuperação, pois mantêm fluxos naturais de sedimentos e água.

Com base na análise das trajetórias de mudança e nos fatores limitantes e facilitadores, busca-se desenvolver cenários de recuperação para cada segmento fluvial. Esses cenários incluem:

- a) Recuperação natural: em trechos com boa conectividade e poucos impactos, a recuperação pode ocorrer espontaneamente, sem necessidade de intervenções significativas;
- b) Recuperação assistida: em segmentos com moderada capacidade de ajuste, são necessárias intervenções leves, como a revegetação ripária ou a remoção de obstáculos;
- c) Recuperação dependente de intervenções intensivas: em trechos altamente degradados,

Esses cenários permitem priorizar esforços e alocar recursos de forma eficiente, concentrando intervenções onde há maior potencial de impacto positivo. A priorização de segmentos para intervenção se baseia em:

- a) Potencial de recuperação: segmentos com maior capacidade de ajuste recebem prioridade, pois têm maior probabilidade de responder positivamente às intervenções;
- b) Importância ecológica e funcional: segmentos que desempenham funções críticas no sistema fluvial, como conectividade longitudinal ou suporte à biodiversidade, são priorizados mesmo em condições de recuperação moderada;
- c) Custo-benefício das intervenções: segmentos com recuperação dependente de intervenções intensivas são priorizados somente quando os benefícios superam os custos (Brierley; Fryirs, 2005).

4.1.4. Aplicações em Gestão e Manejo Fluvial

As avaliações de caracterização, condição e potencial de recuperação devem ser integradas para informar decisões de manejo fluvial e orientar intervenções estratégicas, e assim, desenvolver e implementar um plano de manejo fluvial baseado nos dados geomorfológicos e nas análises de recuperação. Este plano deve ser capaz de:

- a) Promover a sustentabilidade do sistema fluvial, respeitando seus processos geomorfológicos e ecológicos;
- b) Priorizar intervenções com base na importância funcional e no potencial de recuperação dos diferentes segmentos;
- c) Integrar os objetivos geomorfológicos às necessidades socioeconômicas da região, como controle de inundações, uso do solo e preservação da biodiversidade.

A formulação de uma visão física para a bacia, que define os objetivos de longo prazo para o sistema fluvial, deve ser baseada na condição de referência e nos cenários de recuperação identificados, oferecendo uma estrutura para orientar as ações de manejo (Brierley; Fryirs, 2005). Com base na visão física são estabelecidas condições-alvo para cada segmento fluvial, que refletem os objetivos específicos de manejo. Essas condições podem variar de recuperação completa, em segmentos com alta capacidade de ajuste, até intervenções mínimas em trechos irreversivelmente alterados, onde a prioridade é mitigar os impactos e prevenir degradações adicionais (Brierley; Fryirs, 2005).

A priorização de intervenções é um aspecto fundamental, garantindo que os recursos sejam alocados de forma eficiente para maximizar os benefícios ambientais e sociais. Essa priorização é baseada em:

- a) Importância funcional dos segmentos: trechos que conectam diferentes partes da bacia ou sustentam *habitats* críticos recebem prioridade;
- b) Potencial de recuperação: segmentos com alta capacidade de ajuste são priorizados para intervenções de restauração;
- c) Custo-benefício: intervenções que oferecem soluções de baixo custo com impactos positivos significativos são preferidas (Brierley; Fryirs, 2005).

Com base nas condições-alvo e na priorização, são desenvolvidas estratégias específicas para cada segmento. Essas estratégias incluem:

- a) Recuperação baseada na natureza: inclui revegetação, remoção de barreiras e reconfiguração de canais para restaurar processos naturais;
- b) Infraestrutura sustentável: aplicação de soluções como pavimentos permeáveis e reservatórios de retenção para controlar o escoamento superficial e reduzir a pressão sobre os canais;

- c) Educação e engajamento comunitário: envolver as comunidades locais no manejo fluvial para garantir a sustentabilidade das intervenções (Brierley; Fryirs, 2005).

4.1.5. Estilos de Rio (River Styles®): conceito e aplicação no estudo

A abordagem River Styles® (Estilos de Rio) constitui um framework geomorfológico voltado à compreensão da diversidade de formas e processos fluviais em escala de bacia hidrográfica, integrando controles físicos, padrões morfológicos e comportamento do sistema ao longo do tempo (Brierley; Fryirs, 2005). O método parte do princípio de que rios podem ser organizados em segmentos relativamente homogêneos, definidos por atributos geomorfológicos e por seus controles estruturais, permitindo comparar trechos fluviais, compreender trajetórias de ajuste e apoiar análises interpretativas sobre funcionamento e transformação.

A adequação do River Styles® para estudos em bacias urbanizadas decorre, especialmente, de três contribuições. A primeira é a ênfase na segmentação espacial do corredor fluvial, que favorece a identificação de variações internas do sistema que não se explicam apenas pelo contraste urbano–rural. A segunda é o foco em controles geomorfológicos e no confinamento do vale, que permite distinguir trechos em que a morfologia é predominantemente controlada por encostas, terraços e planícies, daqueles em que estruturas tecnogênicas — como aterros, obras de contenção, canalizações e vias — assumem papel dominante. A terceira contribuição é o potencial de integrar observações de campo, análise cartográfica e interpretação de padrões espaciais, oferecendo uma base coerente para dialogar com indicadores ambientais derivados de sensoriamento remoto.

No presente estudo, o River Styles® é mobilizado como referencial interpretativo, e não como eixo metodológico integral. A pesquisa não se dedica à reclassificação formal de estilos fluviais nem à execução completa de todas as etapas de avaliação propostas no framework. Em particular, não se realiza aqui uma aplicação plena dos estágios voltados à estimativa sistemática de potencial de recuperação e à proposição de diretrizes de manejo. A contribuição do River Styles® concentra-se na organização da leitura geomorfológica previamente desenvolvida para a bacia do Ribeirão Brandão e na interpretação do confinamento do vale e da tipologia de margens como variáveis-chave para discutir como pressões antrópicas se expressam no corredor fluvial.

Dessa forma, a abordagem fornece uma base para articular, de maneira consistente, os padrões espaciais observados nos índices espectrais com elementos geomorfológicos do sistema fluvial. Ao integrar informações sobre confinamento e margens com indicadores derivados de imagens orbitais, torna-se possível interpretar tendências de transformação em escala de bacia e discutir implicações para o funcionamento e a trajetória de ajuste dos sistemas fluviais analisados, preservando coerência com o escopo e os objetivos desta pesquisa.

4.2. Índices Espectrais por Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto tem se consolidado como uma ferramenta essencial para os estudos geográficos, especialmente por sua capacidade de fornecer informações de qualidade, abrangentes e detalhadas sobre áreas extensas da superfície terrestre, o que tem sido amplamente possibilitado pela disponibilização de dados gratuitos de satélites, como por exemplo os da série Landsat, cuja longevidade e confiabilidade têm sido destacadas em inúmeros trabalhos acadêmicos (Wulder *et al.*, 2012). O satélite Landsat 8, lançado em 2013, trouxe avanços significativos na captura de imagens, particularmente em relação à resolução espectral e à implementação de correções atmosféricas que aumentam a acurácia dos dados (Roy *et al.*, 2014). Esse nível de refinamento torna os dados obtidos por meio do Landsat 8 fontes seguras e muito utilizadas em estudos de sensoriamento remoto e geoprocessamento, inclusive na análise de índices espectrais como NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), NDWI (*Normalized Difference Water Index*) e NDBI (*Normalized Difference Built-up Index*), utilizados na presente pesquisa.

O uso de dados Landsat para a análise ambiental e monitoramento de mudanças na paisagem terrestre vem sendo amplamente documentado. No contexto das análises ambientais, a série Landsat, particularmente as imagens corrigidas atmosféricamente no nível de processamento "Level-2A", destacam-se por garantir maior confiabilidade nos dados espectrais (USGS, 2021). A utilização de imagens atmosférica e radiometricamente corrigidas é essencial para estudos em que a comparação temporal e espacial é necessária, como no monitoramento de corpos d'água, vegetação e áreas urbanas. O artigo de Almeida *et al.* (2020) exemplifica esse uso, ao demonstrar como imagens Landsat foram empregadas para o monitoramento de partículas sólidas em suspensão em corpos hídricos de grandes dimensões, como o rio Madeira na área de implantação de usinas hidrelétricas. Essa aplicação evidencia

a versatilidade dos dados Landsat, especialmente ao integrar ferramentas de sensoriamento remoto com análises geográficas.

Nos estudos geográficos, o uso de indicadores como o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), NDWI (*Normalized Difference Water Index*) e NDBI (*Normalized Difference Built-up Index*) permite a análise integrada de diferentes elementos da paisagem. Esses índices são particularmente úteis para entender dinâmicas de mudanças na cobertura e uso do solo, condições da vegetação e expansão urbana, aspectos que desempenham papel fundamental na apreensão de diversos fenômenos espaciais.

As imagens do Landsat 8 oferecem vantagens significativas na geração desses índices, uma vez que eliminam distorções espectrais causadas por partículas suspensas na atmosfera ou variações de iluminação, o que é particularmente importante em estudos como o de Almeida *et al.* (2020) sobre o transporte de partículas em suspensão no rio Madeira. Esse tipo de análise depende de informações espectrais precisas, e como a interferência atmosférica pode comprometer a identificação e quantificação de partículas no meio aquático, as imagens corrigidas atmosférica e radiometricamente permitem a produção de resultados mais confiáveis e replicáveis.

No estudo realizado por Almeida *et al.* (2020) também se observa a relevância do uso de ferramentas de geoprocessamento associadas às imagens Landsat para monitorar impactos ambientais em grandes rios. A integração do sensoriamento remoto com análises geoespaciais permitiu compreender os efeitos das mudanças na dinâmica fluvial em função das obras realizadas no rio Madeira. Essa abordagem exemplifica como os dados oriundos do Landsat podem ser empregados para monitorar condições ambientais em áreas distantes ou de difícil acesso, oferecendo informações relevantes para a gestão sustentável dos recursos naturais.

A confiabilidade e a acessibilidade dos dados Landsat tornam essa plataforma uma das mais empregadas em estudos acadêmicos. Segundo Wulder *et al.* (2012), a série Landsat tem se mostrado vital para a análise temporal de mudanças ambientais em larga escala. A introdução do Landsat 8, com suas bandas aprimoradas e resolução espectral melhorada, permitiu avanços no cálculo de índices e no detalhamento de processos como os de urbanização e desmatamento, que podem ser detectados usando NDVI e NDBI (Roy *et al.*, 2014).

Adicionalmente, o NDWI, por meio da identificação de corpos d'água, é essencial para monitorar alterações na hidrografia associadas a mudanças no uso da terra e no clima. O uso do NDWI em corpos hídricos, conforme demonstrado por Gao (1996), também pode ser utilizado para monitorar a movimentação de sedimentos fluviais. O índice destaca mudanças no espectro do verde e no NIR, que são sensíveis às variações de partículas em suspensão na água. Nesse contexto, o NDWI pode complementar os estudos baseados no NDVI e no NDBI, formando um conjunto robusto de indicadores para análise integrada da paisagem

A integração de índices como NDVI, NDWI e NDBI possibilita, assim, uma análise mais abrangente das paisagens e suas transformações, considerando interações entre elementos naturais e antropogênicos. Estudos como os de Almeida *et al.* (2020) ilustram como essa abordagem interdisciplinar pode ser aplicada no monitoramento de impactos ambientais causados por grandes empreendimentos. A capacidade do sensoriamento remoto em capturar mudanças ao longo do tempo torna-o indispensável para estudos que buscam fornecer subsídios para políticas de planejamento e conservação.

4.2.1. Índice NDWI e suas aplicações

O Índice de Diferença Normalizada de Água (NDWI, do inglês *Normalized Difference Water Index*) é uma métrica derivada de imagens de satélite amplamente utilizada para monitorar a presença de água e a umidade superficial em paisagens. Inicialmente, o índice foi proposto por McFeeters (1996) com foco na detecção de corpos hídricos. Entretanto, nesta pesquisa adota-se a formulação apresentada por Gao (1996), que é direcionada para a avaliação do conteúdo de água em vegetação e solos, utilizando a combinação entre as bandas do infravermelho próximo (NIR) e do infravermelho de ondas curtas (SWIR), conforme expresso na Equação 1- NDWI:

$$NDWI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}}$$

Equação 1- NDWI

Nesta equação, ρ_{NIR} se refere à reflectância no infravermelho próximo (aproximadamente 0,85–0,88 μm no Landsat 8 - Banda 5) e ρ_{SWIR} corresponde à reflectância no infravermelho de ondas curtas (aproximadamente 1,57–1,65 μm no

Landsat 8 - Banda 6). O princípio espectral dessa formulação baseia-se no fato de que a reflectância no NIR diminui à medida que aumenta o teor de água na vegetação e no solo, enquanto a absorção no SWIR é ainda mais expressiva sob condições de maior umidade.

Assim, ao normalizar a diferença entre essas bandas, o índice enfatiza regiões com maior conteúdo hídrico e reduz interferências provenientes de variações na iluminação, sombras topográficas ou diferenças de cobertura vegetal. Dessa forma, o NDWI na formulação de Gao (1996) é particularmente adequado para avaliar a umidade geral da bacia, permitindo analisar suas variações espaciais e temporais vinculadas aos processos hidrológicos e às transformações ambientais.

Aplicações na Detecção de Corpos d'Água

O NDWI é amplamente utilizado para mapear corpos d'água como lagos, rios e reservatórios. Valores positivos do índice geralmente indicam a presença de água, enquanto valores próximos de zero ou negativos são associados a outros tipos de cobertura do solo, como vegetação e áreas urbanizadas. Isso torna o NDWI uma ferramenta robusta para monitoramento hídrico em diversas escalas espaciais e temporais (McFeeters, 1996; Xu, 2006).

Aplicações no Monitoramento de Umidade na Vegetação

Além da detecção de corpos d'água, o NDWI também é útil para avaliar a umidade em superfícies vegetadas, particularmente em áreas agrícolas. Neste contexto, o NDWI pode ser uma métrica complementar ao NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), fornecendo informações sobre o estado hídrico das plantas e auxiliando na gestão hídrica e no planejamento agrícola (Gao, 1996).

Aplicações no Monitoramento de Inundações

Em situações de desastres naturais, como inundações, o NDWI pode ser usado para mapear áreas inundadas, oferecendo suporte para avaliação de danos e planejamento de respostas emergenciais. Por sua capacidade de destacar superfícies cobertas por água, ele é amplamente empregado em estudos de risco e gestão de desastres (Li *et al.*, 2013).

Aplicações em Mudanças Ambientais e Climáticas

O NDWI é frequentemente utilizado para monitorar mudanças em corpos d'água ao longo do tempo, permitindo análises de impacto ambiental e climático. Por exemplo, a redução de áreas cobertas por água pode ser uma indicação de mudanças nos padrões climáticos ou impactos causados por atividades humanas, como o desmatamento ou a construção de barragens (Pekel *et al.*, 2016).

Apesar de suas vantagens, o NDWI também possui limitações. Ele pode ser sensível à interferência de nuvens, sombras ou sedimentos em corpos d'água, que podem distorcer os valores do índice. Além disso, áreas de solo úmido podem gerar valores similares aos de corpos d'água, causando ambiguidades na classificação. Para superar essas limitações, o NDWI pode ser combinado com outros índices, como o NDVI, ou com análises adicionais baseadas em aprendizado de máquina (Xu, 2006; Li *et al.*, 2013).

Em resumo, o NDWI é uma ferramenta poderosa e versátil em análises ambientais, permitindo a detecção, o monitoramento e a análise de corpos d'água e da umidade em superfícies vegetadas.

4.2.2.Índice NDVI e suas aplicações

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*) é uma das ferramentas mais amplamente utilizadas no sensoriamento remoto para a análise da vegetação em escala local, regional e global. Desenvolvido inicialmente por Rouse *et al.* (1974), o NDVI é um índice que mede a "saúde" ou vigor da vegetação, baseando-se na reflectância diferencial da vegetação em comprimentos de onda do vermelho (Red) e do infravermelho próximo (NIR).

A fórmula matemática do NDVI é expressa como (Equação 2 – NDVI):

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}}$$

Equação 2 – NDVI

Nessa equação, ρ_{NIR} e ρ_{Red} representam a reflectância nos comprimentos de onda do infravermelho próximo e do vermelho, respectivamente. A lógica por trás dessa fórmula é que a vegetação saudável absorve grande parte da radiação na faixa do vermelho (utilizada no processo de fotossíntese) e reflete uma quantidade significativa de radiação no infravermelho próximo devido à estrutura celular das

folhas (Tucker, 1979). Assim, valores elevados de NDVI, próximos de +1, indicam vegetação densa e saudável, enquanto valores próximos de 0 ou negativos indicam ausência de vegetação, como áreas de solo exposto, corpos d'água ou áreas urbanas.

O NDVI é amplamente empregado em diversas áreas do conhecimento e práticas ambientais, destacando-se as aplicações descritas a seguir.

Aplicações no Monitoramento da Vegetação e Uso do Solo:

O NDVI permite mapear a cobertura vegetal e identificar mudanças no uso do solo ao longo do tempo. Ele é frequentemente utilizado para monitorar desmatamento, regeneração florestal e mudanças sazonais em áreas agrícolas (Huete *et al.*, 2002).

Aplicações na Análise de Saúde Vegetal:

O índice é particularmente útil para identificar áreas de estresse hídrico ou nutricional em plantações. Vegetação estressada apresenta menor absorção no vermelho e maior reflexão no infravermelho, o que se reflete em valores de NDVI mais baixos (Kumar; Monteith, 1981).

Aplicações em Estimativas de Biomassa e Produtividade Primária:

O NDVI é um indicador confiável para estimar a biomassa da vegetação e a produtividade primária bruta, especialmente em escalas regionais e globais. Essas estimativas são essenciais para modelar o ciclo do carbono e prever os impactos das mudanças climáticas (Running *et al.*, 2004).

Aplicações na Gestão de Recursos Naturais:

Em estudos de planejamento e conservação, o NDVI é usado para identificar áreas de alta biodiversidade ou regiões prioritárias para restauração ambiental. Além disso, é uma ferramenta valiosa no manejo de áreas protegidas, onde auxilia no monitoramento da dinâmica da vegetação (Pettorelli *et al.*, 2005).

Aplicações em Estudos Climáticos e Impactos Ambientais:

O NDVI é frequentemente usado para avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre a vegetação, como desertificação e alterações no padrão de sazonalidade da vegetação. Ele também tem sido aplicado para correlacionar

mudanças na vegetação com eventos climáticos extremos, como secas e inundações (Zhang *et al.*, 2003).

Uma das principais vantagens do NDVI é sua simplicidade de cálculo, o que o torna acessível para uma ampla gama de usuários, desde gestores ambientais até pesquisadores em geociências. Ele é amplamente compatível com dados de satélites como Landsat, Sentinel-2 e MODIS, permitindo análises históricas e em tempo quase real. Além disso, o NDVI é normalizado, o que minimiza o impacto de variações locais de iluminação, permitindo comparações entre diferentes regiões e épocas (Rouse *et al.*, 1974).

Apesar de sua utilidade, o NDVI apresenta algumas limitações. Ele pode ser influenciado por fatores atmosféricos, como a presença de nuvens e aerossóis, além de ser sensível a características do solo subjacente, especialmente em áreas com cobertura vegetal esparsa (Huete *et al.*, 2002). Em resposta a essas limitações, outros índices derivados, como o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo e o Índice de Vegetação Aprimorado foram desenvolvidos para mitigar os efeitos do solo e melhorar a sensibilidade em áreas de densidade vegetal moderada.

4.2.3. Índice NDBI e suas aplicações

O Índice de Construção por Diferença Normalizada (NDBI - *Normalized Difference Built-up Index*) é uma métrica derivada de imagens de sensoriamento remoto amplamente utilizada para mapear e identificar áreas urbanizadas e superfícies construídas. Proposto por Zha *et al.* (2003), o NDBI é particularmente útil em estudos de urbanização, pois explora a característica espectral das superfícies construídas que refletem mais intensamente na faixa do infravermelho de ondas curtas (SWIR) em comparação com o infravermelho próximo (NIR).

A fórmula do NDBI é dada por (Equação 3 – NDBI):

$$NDBI = \frac{\rho_{SWIR} - \rho_{NIR}}{\rho_{SWIR} + \rho_{NIR}}$$

Equação 3 – NDBI

Nesta equação, ρ_{SWIR} e ρ_{NIR} representam, respectivamente, a reflectância nas bandas do infravermelho de ondas curtas e do infravermelho próximo. O índice varia de -1 a +1, onde valores positivos indicam maior presença de superfícies

construídas e valores negativos estão associados a vegetação, corpos d'água e outras coberturas de solo não urbanas.

O NDBI baseia-se no princípio de que áreas urbanizadas apresentam padrões de refletância específicos no espectro eletromagnético. Superfícies construídas, como concreto e asfalto, refletem mais na faixa do SWIR devido às suas propriedades térmicas e mineralógicas. Em contrapartida, a vegetação exibe alta reflectância no NIR e baixa no SWIR, enquanto corpos d'água refletem pouco em ambas as faixas espectrais (Zha *et al.*, 2003). Essa diferença de comportamento espectral permite que o NDBI destaque superfícies construídas em detrimento de outros tipos de cobertura do solo.

O NDBI é amplamente utilizado em estudos urbanos e ambientais devido à sua capacidade de mapear superfícies construídas de forma eficiente. Algumas de suas principais aplicações são descritas a seguir.

Aplicações no Mapeamento Urbano e Expansão Urbana:

O NDBI é frequentemente usado para monitorar a expansão de áreas urbanas, identificar novos desenvolvimentos e avaliar padrões de urbanização ao longo do tempo (Xu, 2008). Por meio da análise multitemporal, é possível rastrear o crescimento de cidades e prever tendências de ocupação do solo.

Aplicações no Planejamento Urbano e Ordenamento Territorial:

Ferramentas baseadas no NDBI auxiliam no planejamento urbano ao identificar áreas críticas de densidade construída e possíveis zonas de expansão. Isso é especialmente relevante para o planejamento sustentável de infraestruturas e serviços urbanos (Hossain *et al.*, 2019).

Aplicações na Análise de Impactos Ambientais:

Ao destacar superfícies construídas, o NDBI é usado para avaliar os impactos ambientais relacionados à urbanização, como aumento da temperatura superficial (efeito de ilha de calor) e impermeabilização do solo, que intensifica o escoamento superficial e contribui para enchentes urbanas (Weng, 2001).

Aplicações no Monitoramento de Infraestruturas:

Em aplicações específicas, o NDBI pode ser combinado com outros índices, como NDVI e NDWI, para avaliar a relação entre áreas construídas, vegetação e corpos d'água, proporcionando uma visão integrada do ambiente urbano.

O NDBI apresenta várias vantagens operacionais e analíticas, como a simplicidade de cálculo, compatibilidade com diferentes plataformas de sensoriamento remoto (e.g., Landsat, Sentinel-2) e eficácia em discriminar superfícies construídas de outras coberturas de solo. Além disso, o índice permite análises multitemporais devido à disponibilidade de séries históricas de dados de satélite.

Apesar de sua eficácia, o NDBI enfrenta desafios em áreas onde superfícies construídas estão misturadas com vegetação ou solos expostos. Isso ocorre porque a diferença espectral entre SWIR e NIR pode não ser suficientemente acentuada para distinguir entre essas classes. Além disso, condições atmosféricas adversas, como a presença de nuvens ou aerossóis, podem interferir na precisão dos resultados (Zha *et al.*, 2003; Xu, 2008).

4.3. Relações entre NDVI, NDWI e NDBI

Complementaridade Espectral e Temática

O NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) está relacionado à densidade e vigor da vegetação, sendo amplamente utilizado para avaliar áreas verdes e sua saúde (Rouse *et al.*, 1974). Por outro lado, o NDWI (*Normalized Difference Water Index*) é empregado para identificar a presença de corpos d'água e monitorar a umidade do solo ou da vegetação (McFeeters, 1996). O NDBI (*Normalized Difference Built-up Index*), por sua vez, é usado para detectar superfícies construídas, como áreas urbanizadas e infraestrutura (Zha *et al.*, 2003).

Ao combinar esses índices, é possível delinear diferentes classes de cobertura e uso do solo. Por exemplo, áreas com alto NDVI e baixo NDWI indicam vegetação seca, enquanto regiões com baixo NDVI, alto NDWI e alto NDBI podem representar áreas urbanas próximas a corpos d'água (Xu, 2008).

Interpretação Multiescalar

Estudos multitemporais que utilizam os três índices ajudam a entender mudanças na paisagem ao longo do tempo. Por exemplo, a conversão de áreas vegetadas em superfícies construídas tende a reduzir o NDVI e aumentar o NDBI.

Simultaneamente, se áreas de corpos d'água forem drenadas para urbanização, o NDWI diminuirá, e o NDBI aumentará (Hossain *et al.*, 2019).

Identificação de Áreas de Transição

Áreas de transição, como zonas periurbanas, apresentam dinâmicas complexas que podem ser melhor compreendidas por meio da relação entre esses índices. Por exemplo, um NDVI médio, um NDWI baixo e um NDBI moderado podem indicar áreas onde a vegetação está sendo substituída por uso urbano ou onde há misturas entre vegetação, solo exposto e infraestrutura urbana (Weng, 2001).

Relação com o Ciclo Hidrológico

O NDWI é particularmente relevante para monitorar a disponibilidade hídrica, enquanto o NDVI pode indicar a resposta da vegetação a essa disponibilidade. O NDBI, por sua vez, está associado à impermeabilização do solo em áreas urbanas, que afeta a infiltração de água e aumenta o escoamento superficial (Xu, 2006). Portanto, a integração dos índices pode ser usada para estudar impactos ambientais da urbanização sobre o ciclo hidrológico.

Aplicação em Modelagem da Cobertura e Uso do Solo

A combinação dos índices é frequentemente utilizada em estudos de classificação de cobertura e uso do solo. Por exemplo, em análises supervisionadas ou não supervisionadas, o uso conjunto do NDVI, NDWI e NDBI pode melhorar a acurácia da classificação ao diferenciar classes de cobertura como vegetação densa, corpos d'água, superfícies construídas e solo exposto (Zha *et al.*, 2003; McFeeters, 1996).

5. METODOLOGIA

A metodologia empregada nesta pesquisa a bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão contempla diferentes etapas.

As etapas ligadas ao Sensoriamento Remoto (Figura 11) iniciaram-se com a aquisição e processamento de imagens de satélite Landsat 8. As imagens utilizadas foram adquiridas entre janeiro de 2014 e dezembro de 2024, tendo sido selecionadas 106 imagens (ver Tabela 4 - Tabela de Imagens) por meio da plataforma Catálogo do INPE, priorizando aquelas livres de nuvens na área de estudo. Para garantir a precisão

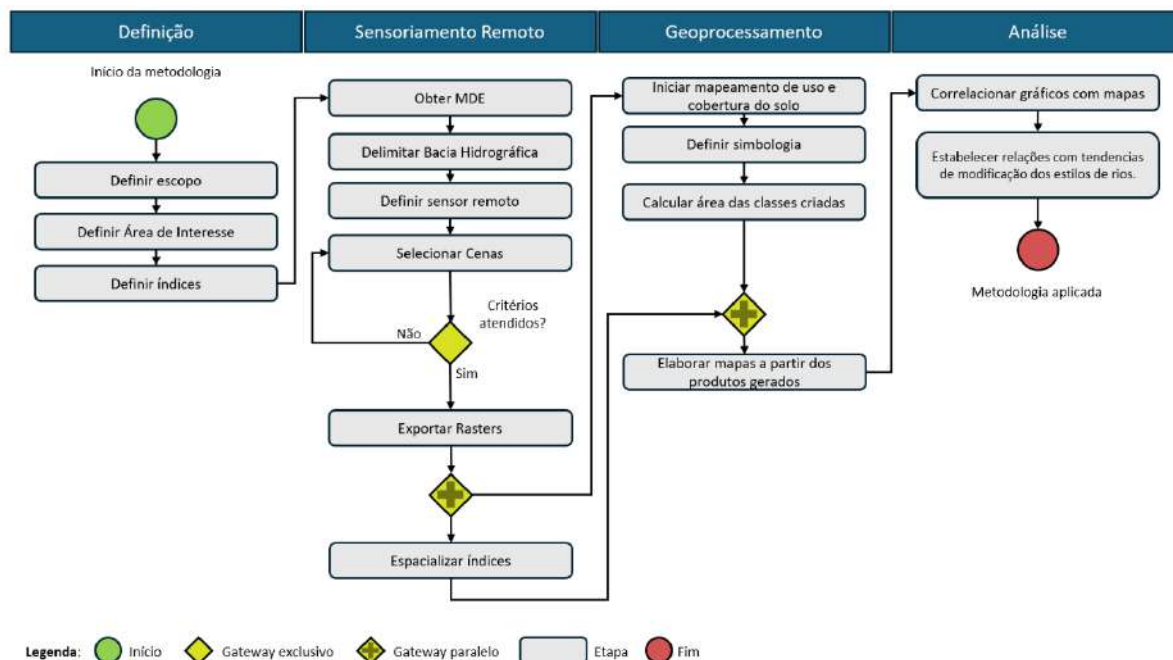
das análises, a área da bacia hidrográfica foi previamente delimitada a partir de uma máscara em formato *shapefile*, o que permitiu isolar a área de interesse e evitar informações redundantes ou externas ao escopo do estudo.

Os dados obtidos correspondem às imagens LC08_L2SP_217076 e LC08_L2SP_218075, que já passaram por correções radiométricas e atmosféricas, assegurando a qualidade dos valores de reflectância na superfície e permitindo sua aplicação direta nas análises. As imagens foram processadas para derivar produtos como NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), NDWI (*Normalized Difference Water Index*) e NDBI (*Normalized Difference Built-up Index*), além da elaboração de mapas temáticos de cobertura e uso do solo. Esses índices foram escolhidos devido à sua capacidade de capturar aspectos críticos relacionados à vegetação, dinâmica hídrica e urbanização, elementos essenciais para compreender as transformações na bacia ao longo da década.

Um aspecto metodológico importante foi a automação do processamento dos índices mencionados. As análises foram realizadas em lotes, utilizando *scripts* que foram elaborados por mim especificamente para este propósito. Esse procedimento garantiu a consistência dos resultados e aumentou a eficiência na geração dos produtos. Os *scripts* estão expostos em anexo, e os gráficos que auxiliam na visualização dos resultados, serão apresentados em seções subsequentes, em que estão detalhadas as etapas do processamento e apresentados os principais achados.

Além disso, gerou-se mapas dos índices gerados, visando correlacionar as transformações observadas nas imagens de satélite com as alterações nos estilos fluviais. Essa abordagem multiescalar e temporal possibilitou uma visão abrangente das mudanças ocorridas na bacia. O enfoque das análises está sendo orientado para os tributários do Ribeirão Brandão e o próprio coletor principal, considerando-se também as respectivas sub bacias.

Figura 11 - Fluxograma metodológico das etapas



5.1. Aquisição e preparação dos dados de sensoriamento remoto

As etapas relacionadas ao sensoriamento remoto (Figura 11) iniciaram-se com a aquisição e o processamento de imagens do satélite Landsat 8. Foram utilizadas imagens adquiridas entre janeiro de 2014 e dezembro de 2024, totalizando 106 cenas, selecionadas a partir do Catálogo de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), priorizando-se aquelas com baixa ou nenhuma cobertura de nuvens sobre a área de estudo (Tabela 4).

A área da bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão foi previamente delimitada por meio de uma máscara vetorial em formato shapefile, empregada para o recorte espacial das imagens e para a exclusão de informações externas ao escopo da pesquisa. As cenas utilizadas correspondem aos produtos LC08_L2SP_217076 e LC08_L2SP_218075, que já passaram por correções radiométricas e atmosféricas, garantindo a confiabilidade dos valores de reflectância de superfície e permitindo sua aplicação direta nos cálculos espectrais.

A partir dessas imagens foram derivados o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*), o Índice de Água por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Water Index*) e o Índice de Área Construída por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Built-up Index*), bem como mapas temáticos de cobertura e uso do solo. Esses índices foram selecionados

por sua capacidade de representar, de forma integrada, aspectos relacionados à vegetação, à umidade superficial e à artificialização da paisagem, elementos fundamentais para a análise das transformações recentes na bacia.

5.2. Automação do processamento e geração dos produtos

Um aspecto metodológico central desta pesquisa foi a automação do processamento das imagens e dos índices espectrais, viabilizando a análise de um grande volume de dados de forma padronizada e replicável. O processamento foi realizado em modo de lote, por meio de rotinas computacionais desenvolvidas em linguagem Python no ambiente ArcGIS, destinadas especificamente à execução sequencial das seguintes etapas: recorte das imagens pela máscara da bacia, cálculo dos índices espectrais, agregação temporal dos resultados por médias anuais e exportação automática de mapas e gráficos.

A utilização dessas rotinas de automação assegurou consistência metodológica entre os diferentes anos analisados, reduziu interferências operacionais no processamento e permitiu a replicação integral do procedimento tanto para a bacia do Ribeirão Brandão quanto para a sub-bacia do Córrego do Curral-Leste. Os códigos utilizados encontram-se disponibilizados em anexo, acompanhados de descrições funcionais das principais etapas de processamento.

5.3. Articulação entre metodologia e base conceitual geomorfológica

A leitura e a interpretação dos produtos derivados do sensoriamento remoto foram orientadas por atributos geomorfológicos discutidos na base conceitual, especialmente aqueles relacionados ao confinamento do vale fluvial, à tipologia das margens e à distinção entre controles geomorfológicos naturais e controles tecnogênicos. Esses elementos não foram operacionalizados como variáveis de cálculo, mas atuaram como guia interpretativo na etapa de análise integrada dos resultados.

Dessa forma, os padrões espaciais e temporais observados nos índices espectrais foram analisados à luz da organização geomorfológica do sistema fluvial previamente caracterizada, permitindo discutir como diferentes níveis de confinamento, presença de margens antropizadas e interferências estruturais condicionam a distribuição da vegetação, da umidade superficial e da artificialização ao longo da bacia. Essa articulação possibilitou superar leituras estritamente

temáticas dos índices, integrando-os a uma interpretação sistêmica das trajetórias de transformação dos canais fluviais e de seus ambientes adjacentes.

5.4. Escala de análise e recortes espaciais

As análises foram conduzidas em duas escalas complementares. Inicialmente, os índices espectrais e os mapas de uso e cobertura do solo foram avaliados para a totalidade da bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão, permitindo identificar tendências gerais de transformação ao longo da última década. Em seguida, adotou-se como recorte de maior detalhamento a sub-bacia do Córrego do Curral-Leste, localizada no Setor Sul do município de Volta Redonda, com o objetivo de verificar a persistência e a intensificação dos padrões observados na escala da bacia principal.

Essa estratégia permitiu avaliar a coerência espacial dos resultados e explorar, em escala mais fina, a relação entre mudanças na cobertura da terra, pressões urbanas e condicionantes geomorfológicos dos sistemas fluviais tributários.

5.5. Limitações e incertezas dos dados

As análises desenvolvidas nesta pesquisa estão sujeitas a limitações inerentes à resolução espacial e espectral das imagens Landsat 8, cuja resolução de 30 metros implica a ocorrência de pixels mistos, especialmente em áreas de transição entre usos da terra. Esse efeito é particularmente relevante em bordas urbanas, loteamentos em processo de consolidação e setores com alternância entre solo exposto, vegetação rasteira e superfícies construídas.

A mistura espectral associada a essas situações pode gerar respostas ambíguas nos índices espectrais, resultando em transições aparentemente improváveis, como a conversão de áreas classificadas como urbanas para classes não urbanas em determinados intervalos temporais. Tais ocorrências devem ser interpretadas como limites técnicos do dado, e não como evidência direta de reversão territorial ou de processos efetivos de desurbanização.

Essas incertezas foram consideradas na interpretação dos resultados, especialmente na análise do Índice de Área Construída por Diferença Normalizada, e reforçam a importância de integrar a leitura espectral a informações geomorfológicas, históricas e contextuais, evitando interpretações literais ou determinísticas das mudanças detectadas.

5.6. Geração de índices

Dado o elevado número de imagens, foram desenvolvidos scripts automatizados em ambiente Python, integrando bibliotecas como ArcPy, NumPy e Rasterio, para o cálculo sistemático dos índices NDVI, NDWI e NDBI. A automação permitiu o processamento padronizado, célula a célula, de todas as imagens, garantindo agilidade, rastreabilidade e consistência analítica ao longo de toda a série temporal.

Os índices processados foram exportados no formato raster e, posteriormente, espacializados em mapas temáticos. A média anual de cada índice foi consolidada em gráficos analíticos - incluindo boxplots, gráficos de dispersão com linha de tendência e curvas temporais - que permitiram visualizar e quantificar a variação espaço-temporal da vegetação, umidade e urbanização ao longo de dez anos. Esses dados se mostraram fundamentais para subsidiar as etapas subsequentes.

Cálculo do NDVI

O código utilizado (Anexo 2 *Código a*) realiza o cálculo do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) para imagens Landsat 8 utilizando a biblioteca ArcPy, que é uma extensão do Python voltada para automação de processos geoespaciais no ArcGIS. A biblioteca permite manipular e analisar dados espaciais de forma eficiente e automatizada.

O código começa importando os módulos necessários: o ArcPy, que fornece funcionalidades principais do ArcGIS, e o módulo Spatial Analyst, necessário para operações raster como o cálculo do NDVI. A licença do Spatial Analyst deve estar ativa para que o código funcione corretamente.

Em seguida, configura-se o ambiente de trabalho utilizando `arcpy.env.workspace`, que define o diretório onde estão armazenadas as imagens raster de entrada, e `arcpy.env.overwriteOutput`, que permite sobrescrever arquivos existentes durante o processamento, evitando erros de duplicidade.

O diretório de saída onde os arquivos NDVI resultantes serão armazenados é definido na variável `output_folder`. Isso assegura uma organização eficiente dos arquivos gerados.

A função `arcpy.ListRasters("", "TIF")` lista todos os arquivos raster com extensão .TIF no diretório de trabalho. Esses arquivos são armazenados na variável `raster_list`, que será processada em um loop `for`.

No loop, cada arquivo é analisado para verificar se contém a string `_B4` em seu nome. Isso identifica a Banda 4 (Red) do Landsat 8, essencial para o cálculo do NDVI. O arquivo correspondente é carregado como um objeto Raster utilizando a função `Raster`. Em seguida, o nome da Banda 4 é ajustado para localizar a Banda 5 (NIR), substituindo `_B4` por `_B5`. A Banda 5 também é carregada como um objeto Raster.

Nesta fórmula, o infravermelho próximo (NIR) e o vermelho (Red) são subtraídos e somados, e o índice resultante varia entre -1 e 1. O NDVI é amplamente utilizado em estudos de sensoriamento remoto para medir a saúde e a densidade da vegetação (Rouse et al., 1974).

O nome do arquivo de saída é gerado dinamicamente utilizando a estrutura f-string do Python. A função `raster.split('_')[3]` divide o nome do arquivo em partes, separadas pelo caractere `_`, e utiliza a quarta parte (geralmente uma data no formato YYYYMMDD) para identificar o raster. O nome gerado segue o padrão `NDVI_<data>.tif` e é salvo no diretório de saída especificado.

Após calcular o NDVI, o arquivo é salvo utilizando o método `ndvi.save(output_name)`. O código exibe mensagens no terminal indicando o progresso, com uma mensagem para cada arquivo processado e uma mensagem final indicando a conclusão do processo.

Este código é um exemplo típico de automação em sensoriamento remoto, integrando manipulação de dados raster e cálculo de índices espectrais com eficiência. Ele permite processar grandes volumes de dados de maneira rápida, padronizada e repetível, sendo útil em aplicações ambientais, agrícolas e de monitoramento de mudanças na cobertura terrestre.

Cálculo do NDBI

O código apresentado (Anexo Código c) automatiza o cálculo do NDBI (*Normalized Difference Built-up Index*) e o recorte dos resultados para uma área de interesse específica. O NDBI é um índice amplamente utilizado em estudos de sensoriamento remoto para identificar áreas urbanizadas com base na diferença espectral entre o infravermelho de ondas curtas (SWIR) e o infravermelho próximo (NIR). Este índice varia de -1 a 1, com valores positivos indicando áreas urbanas e construções.

A execução do código começa com a importação do módulo `ArcPy`, que permite manipular e processar dados espaciais no ArcGIS, e do módulo `Spatial Analyst`,

necessário para operações raster como o cálculo do NDBI. O ambiente de trabalho é configurado por meio de `arcpy.env.workspace`, definindo o diretório onde estão localizados os rasters de entrada, e `arcpy.env.overwriteOutput`, que permite sobrescrever arquivos existentes nos diretórios de saída.

Os diretórios de saída são especificados nas variáveis `ndbi_folder` e `clip_folder`. O primeiro armazena os arquivos NDBI calculados, enquanto o segundo guarda os arquivos recortados com base em uma máscara geométrica. A máscara de recorte, representada pela feature class `Bacia_Brandao`, está armazenada em uma geodatabase e delimita a área de interesse onde o clip será aplicado.

O código utiliza a função `arcpy.ListRasters` para listar todos os arquivos raster no diretório de entrada que possuem a extensão `.TIF`. Estes arquivos são processados em um loop `for`, que verifica se o nome do arquivo contém a string `_B6`, indicando que é a Banda 6 (SWIR) do Landsat 8. O nome da Banda 6 é ajustado para localizar a Banda 5 (NIR) correspondente, substituindo `_B6` por `_B5`. Ambas as bandas são carregadas como objetos raster no ArcPy.

A fórmula calcula a diferença normalizada entre as bandas SWIR e NIR, destacando áreas urbanizadas com maior reflectância no SWIR.

Os resultados são salvos em arquivos com nomes dinâmicos, gerados ao extrair a 4ª parte do nome original do raster, geralmente uma data no formato `YYYYMMDD`. O método `ndbi.save` salva o raster calculado no diretório `ndbi_folder`.

Após o cálculo, o código aplica o recorte no raster NDBI utilizando a ferramenta `arcpy.management.Clip`. A geometria da máscara `clip_feature` delimita a área do recorte. O parâmetro `clipping_geometry="ClippingGeometry"` assegura que o recorte siga os limites exatos da máscara, enquanto `maintain_clipping_extent="NO_MAINTAIN_EXTENT"` impede que o recorte seja expandido além da área da máscara. Os resultados recortados são armazenados no diretório `clip_folder` com o prefixo `Clip_` adicionado ao nome original.

Mensagens de progresso são exibidas para indicar o status do processamento de cada raster, e uma mensagem final confirma a conclusão do cálculo e do clip de todos os rasters.

Este código exemplifica boas práticas em automação geoespacial, combinando cálculos raster e operações de clip para grandes volumes de dados de sensoriamento remoto. É uma abordagem eficiente e escalável para identificar e analisar áreas urbanas em projetos de ocupação do solo e planejamento urbano.

Cálculo do NDWI

O código apresentado (Anexo 2.d) realiza o cálculo do NDWI (*Normalized Difference Water Index*) e aplica o recorte dos resultados utilizando uma máscara geométrica definida por uma feature class. O NDWI é um índice utilizado para identificar corpos d'água em imagens de satélite, destacando regiões onde a reflectância da banda Green (Banda 3) é superior à da banda NIR (Banda 5). Ele é amplamente utilizado em estudos de sensoriamento remoto voltados ao monitoramento de recursos hídricos e mudanças em corpos d'água.

O código começa com a importação do módulo ArcPy, que permite a manipulação e análise de dados geoespaciais no ArcGIS, e do módulo Spatial Analyst, essencial para operações raster, como o cálculo do NDWI. A configuração do ambiente é realizada por meio de `arcpy.env.workspace`, que define o diretório onde estão armazenadas as imagens raster de entrada, e `arcpy.env.overwriteOutput`, que permite a sobrescrita de arquivos existentes, evitando conflitos ao salvar os resultados.

Os diretórios de saída são especificados em duas variáveis: `ndwi_folder`, onde serão armazenados os arquivos NDWI calculados, e `clip_folder`, que receberá os arquivos resultantes do recorte. A máscara de recorte, definida pela feature class `Bacia_Brandao`, é um polígono que delimita a área de interesse para o processo.

A função `arcpy.ListRasters("*", "TIF")` lista todos os arquivos raster no diretório de entrada com extensão `.TIF`. Estes arquivos são processados em um loop que verifica se o nome do arquivo contém a string `_B3`, indicando que é a Banda 3 (Green) do Landsat 8. O arquivo correspondente é carregado como um objeto raster. Em seguida, o nome da Banda 3 é ajustado para localizar a Banda 5 (NIR) correspondente, substituindo `_B3` por `_B5`. Ambas as bandas são então carregadas como objetos raster.

Essa fórmula destaca corpos d'água devido à maior reflectância da banda Green em relação à banda NIR. O raster resultante do cálculo é salvo no diretório `ndwi_folder` com um nome dinâmico gerado a partir da data presente no nome original do raster.

Após o cálculo, o código aplica o recorte nos rasters NDWI utilizando a ferramenta `arcpy.management.Clip`. A máscara de recorte, definida por `clip_feature`, é utilizada para limitar os dados à área de interesse. O parâmetro `clipping_geometry="ClippingGeometry"` garante que o recorte siga exatamente os

limites da geometria, enquanto `maintain_clipping_extent="NO_MAINTAIN_EXTENT"` impede que o raster seja expandido além dos limites da máscara. Os resultados recortados são armazenados no diretório `clip_folder` com o prefixo `Clip_` adicionado ao nome original.

Mensagens são exibidas para indicar o progresso do processamento de cada raster, e uma mensagem final confirma a conclusão do cálculo e recorte de todos os rasters. Este código automatiza o processamento de grandes volumes de dados raster, integrando cálculos de índices espectrais e operações de clip para focar a análise em áreas específicas de interesse.

O NDWI é fundamental em estudos ambientais e hídricos, permitindo identificar corpos d'água e avaliar mudanças temporais em sua extensão. Este tipo de automação é uma prática comum em projetos de sensoriamento remoto, facilitando a análise repetitiva de múltiplos conjuntos de dados.

Aplicação de máscara de recorte de área

O código utilizado (Anexo 2 Código b) realiza o clip em lote de rasters utilizando uma geometria de referência (máscara) armazenada em uma geodatabase (.gdb). O processo de clip é amplamente utilizado em análises espaciais para limitar a extensão dos dados raster a uma área de interesse, reduzindo o tamanho dos arquivos e tornando a análise mais focada e eficiente.

A execução do código começa com a importação do módulo `ArcPy`, uma biblioteca do ArcGIS para automação de tarefas geoespaciais. O módulo permite manipular, processar e analisar dados espaciais de maneira eficiente. O ambiente de trabalho é configurado com `arcpy.env.workspace`, definindo o diretório onde estão armazenados os rasters NDVI que serão processados. Além disso, a configuração `arcpy.env.overwriteOutput` permite que arquivos de saída existentes sejam sobrescritos, evitando erros de duplicidade.

O código define o diretório de saída na variável `output_folder`, garantindo que os arquivos resultantes do clip sejam armazenados em um local separado e organizado. A máscara de recorte é especificada na variável `clip_feature`, que aponta para a feature class `Bacia_Brandao` dentro de uma geodatabase. Essa geometria é do tipo polígono, sendo ideal para recortar rasters.

Em seguida, a função `arcpy.ListRasters("*", "TIF")` é utilizada para listar todos os arquivos raster com extensão `.TIF` no diretório de entrada. Esses arquivos são armazenados na variável `ndvi_rasters`, que será processada por um loop `for`.

Para cada raster listado, o código define o nome do arquivo de saída, adicionando o prefixo `Clip_` ao nome original. Esse nome é armazenado na variável `output_raster` e utilizado para salvar os resultados do clip no diretório de saída.

O método `arcpy.management.Clip` realiza o recorte de cada raster com base na geometria da máscara especificada. Os principais parâmetros dessa função incluem:

- a) `in_raster`: O raster que será recortado;
- b) `rectangle`: Define um retângulo de recorte, mas é deixado vazio quando se utiliza uma máscara geométrica;
- c) `out_raster`: Caminho onde o raster recortado será salvo;
- d) `in_template_dataset`: A máscara utilizada para o recorte, definida como a feature class `Bacia_Brandao`;
- e) `clipping_geometry="ClippingGeometry"`: Especifica que o recorte seguirá exatamente os limites da geometria da máscara, sem incluir áreas externas;
- f) `maintain_clipping_extent="NO_MAINTAIN_EXTENT"`: Garante que o recorte não seja expandido para um retângulo maior, mantendo a precisão da área recortada.

Durante o processamento, o código exibe mensagens para cada raster indicando que o clip foi concluído com sucesso. Ao final do loop, uma mensagem de conclusão geral é exibida, confirmando que todos os rasters foram processados.

Este código é um exemplo de automação de análises geoespaciais, integrando a manipulação de dados raster e vetoriais em um processo padronizado e eficiente. O uso do clip em lote é particularmente útil em projetos que envolvem grandes volumes de dados, permitindo que a análise seja restrita a áreas de interesse específicas e reduzindo o tempo de processamento. Além disso, a separação clara entre os diretórios de entrada e saída facilita a organização dos dados e a reprodutibilidade do trabalho.

Cálculo da média do NDVI

O código (Anexo 2 Código e) realiza o cálculo da média dos rasters Clip_NDVI utilizando a ferramenta Cell Statistics do módulo Spatial Analyst no ArcPy. Este procedimento é útil para agregar informações de múltiplos rasters em um único arquivo, onde cada célula representa a média dos valores correspondentes nos rasters de entrada. O objetivo é obter uma visão consolidada do comportamento do índice NDVI para uma área ou período específicos.

O código inicia com a importação dos módulos ArcPy e Spatial Analyst. O módulo ArcPy permite manipular e processar dados geoespaciais no ArcGIS, enquanto o Spatial Analyst fornece as ferramentas necessárias para operações avançadas com rasters, como o cálculo de estatísticas entre múltiplos arquivos. Em seguida, configura-se o ambiente de trabalho com `arcpy.env.workspace`, que define o diretório onde estão localizados os rasters Clip_NDVI, e com `arcpy.env.overwriteOutput`, que habilita a sobrescrita de arquivos de saída já existentes, evitando conflitos de nome.

O caminho de saída do raster médio é especificado na variável `output_raster`, que define o nome do arquivo consolidado como `Média_Clip_NDVI.tif` e a pasta onde ele será salvo. O código utiliza a função `arcpy.ListRasters` para listar todos os arquivos no diretório configurado cujo nome começa com `Clip_NDVI` e possui a extensão `.TIF`. Os arquivos correspondentes são armazenados na variável `ndvi_rasters`, que será processada posteriormente.

Antes de realizar o cálculo da média, o código verifica se há rasters disponíveis na lista `ndvi_rasters`. Caso a lista esteja vazia, uma mensagem é exibida informando que não há arquivos para processar, e o código termina. Caso contrário, a função Cell Statistics é utilizada para calcular a média dos rasters na lista. A ferramenta Cell Statistics opera célula a célula entre todos os rasters de entrada, aplicando a operação de média em cada posição correspondente. O parâmetro "DATA" garante que apenas valores válidos sejam considerados, ignorando células com valores NoData.

O raster resultante do cálculo é salvo no diretório especificado por `output_raster` utilizando o método `save()`, e uma mensagem é exibida confirmando que o arquivo foi gerado com sucesso. Se nenhum arquivo compatível for encontrado no diretório de entrada, uma mensagem informativa é exibida para o usuário.

Fórmula Geral para a Média do NDVI

Seja $NDVI_{i,j,k}$ o valor de NDVI na célula (i,j) no raster k , a média do NDVI é calculada como (*Equação 4 - Média do NDVI*):

$$Média\ do\ NDVI\ i,j = \frac{\sum_{k=1}^n NDVI\ i,j,k}{n}$$

Equação 4 - Média do NDVI

- n : Número total de rasters utilizados no cálculo.
- $NDVI\ i,j,k$: Valor do NDVI na célula (i,j) do raster k .

A saída é um raster onde cada célula (i,j) contém o valor médio de NDVI para essa posição em todos os rasters de entrada.

Este código oferece uma abordagem automatizada para calcular a média de múltiplos rasters, sendo especialmente útil em estudos que envolvem séries temporais ou análises regionais. O resultado final, um raster consolidado, pode ser utilizado em análises posteriores para compreender o comportamento médio do índice NDVI em determinada área ou período.

Cálculo de média do NDBI

O código apresentado (Anexo 2 Código f) realiza o cálculo da média dos rasters Clip_NDBI, utilizando a ferramenta Cell Statistics do módulo Spatial Analyst no ArcPy. Esse processo permite consolidar informações de múltiplos rasters previamente recortados que representam o índice NDBI (*Normalized Difference Built-up Index*), gerando um único raster que sintetiza os valores médios de cada célula. O resultado é especialmente útil em análises espaciais que exigem a integração de dados regionais ou temporais.

O código inicia com a importação dos módulos ArcPy e Spatial Analyst, necessários para a manipulação de dados geoespaciais e operações raster. A configuração do ambiente é realizada com `arcpy.env.workspace`, que define o diretório onde estão armazenados os rasters de entrada com o prefixo Clip_NDBI, e `arcpy.env.overwriteOutput`, que permite sobrescrever arquivos existentes no diretório de saída. O arquivo raster médio resultante será salvo no local especificado pela variável `output_raster`, que define o caminho e o nome do arquivo consolidado como Média_Clip_NDBI.tif.

Em seguida, o código utiliza a função `arcpy.ListRasters` para listar todos os arquivos no diretório que possuem o prefixo Clip_NDBI e extensão .TIF. Os arquivos encontrados são armazenados na variável `ndbi_rasters`. Antes de realizar o cálculo, o

código verifica se há arquivos na lista com a condição `if len(ndbi_rasters) > 0`. Caso não existam arquivos disponíveis, uma mensagem informativa é exibida, indicando que o cálculo não pode ser realizado.

Se houver rasters disponíveis, o cálculo da média é realizado utilizando a função `Cell Statistics`, que opera célula a célula em todos os rasters da lista. A operação de média considera apenas os valores válidos de cada célula, ignorando as células com valores `NoData`, como especificado pelo parâmetro `"DATA"`. O resultado é um raster consolidado, armazenado na variável `mean_ndbi`, onde cada célula contém o valor médio das células correspondentes de todos os rasters de entrada.

O raster médio é salvo no diretório de saída utilizando o método `save()`, e uma mensagem é exibida no terminal para confirmar que o arquivo foi salvo com sucesso. Caso a lista de rasters esteja vazia, uma mensagem alternativa informa a ausência de arquivos compatíveis para o cálculo.

Fórmula Geral para a Média do NDBI

Seja $NDBI_{i,j,k}$ o valor de NDBI na célula (i,j) no raster k , a média do NDBI é calculada como (Equação 5):

$$Média\ do\ NDBI\ i,j = \frac{\sum_{k=1}^n NDBI\ i,j,k}{n}$$

Equação 5 - Média do NDBI

- n : Número total de rasters utilizados no cálculo.
- $NDBI_{i,j,k}$: Valor do NDBI na célula (i,j) do raster k .

A saída segue o mesmo padrão: um raster onde cada célula contém o valor médio de NDBI.

Esse processo é altamente eficiente e escalável, permitindo lidar com grandes volumes de dados raster. Ele é particularmente útil em estudos de sensoriamento remoto que demandam uma visão integrada de áreas urbanas identificadas pelo índice NDBI, sendo aplicável em análises regionais ou temporais.

Cálculo de média NDWI

O código (Anexo 2 Código g) realiza o cálculo da média dos rasters `Clip_NDWI`, previamente processados e recortados, utilizando a ferramenta `Cell Statistics` do módulo `Spatial Analyst` no `ArcPy`. Essa abordagem gera um único raster onde cada célula representa a média dos valores correspondentes de múltiplos rasters,

facilitando a análise consolidada de índices de água em uma área ou período específico.

A execução inicia com a importação do módulo ArcPy, que fornece funcionalidades para manipulação e análise de dados espaciais no ArcGIS, e do módulo Spatial Analyst, necessário para operações avançadas com rasters, como o cálculo estatístico célula a célula. A configuração do ambiente é feita com `arcpy.env.workspace`, que define o diretório onde estão armazenados os rasters Clip_NDWI, e `arcpy.env.overwriteOutput`, que habilita a sobrescrita de arquivos existentes para evitar conflitos ao salvar os resultados.

O arquivo raster consolidado será salvo no local especificado pela variável `output_raster`, que define o caminho e o nome do raster médio resultante. Em seguida, o código utiliza a função `arcpy.ListRasters` para listar todos os arquivos no diretório que começam com Clip_NDWI e possuem a extensão .TIF. A lista de rasters correspondentes é armazenada na variável `ndwi_rasters`, que será processada na etapa subsequente.

O código verifica se há rasters disponíveis na lista `ndwi_rasters` por meio da condição `if len(ndwi_rasters) > 0`. Caso existam arquivos, a função Cell Statistics é usada para calcular a média célula a célula entre os rasters listados. Essa ferramenta opera de forma eficiente, aplicando a operação de média em cada posição correspondente nos rasters de entrada. O parâmetro "DATA" garante que apenas valores válidos sejam considerados, ignorando células com valores NoData.

O raster resultante do cálculo da média é salvo no local especificado utilizando o método `save()`, e uma mensagem de confirmação é exibida, informando que o arquivo foi gerado com sucesso. Caso não sejam encontrados rasters compatíveis no diretório, uma mensagem informativa é exibida, indicando que o cálculo não pôde ser realizado.

Fórmula Geral para a Média do NDWI

Seja $NDWI_{i,j,k}$ o valor de NDWI na célula (i,j) no raster k, a média do NDWI é calculada como (Equação 6 - Média do NDWI):

$$Média\ do\ NDWI\ i,j = \frac{\sum_{k=1}^n NDWI\ i,j,k}{n}$$

Equação 6 - Média do NDWI

- n : Número total de rasters utilizados no cálculo.
- $NDWI_{i,j,k}$: Valor do NDWI na célula (i,j) do raster k .

Essa fórmula também produz um raster onde cada célula contém a média de NDWI calculada a partir de todos os rasters.

Este código é útil para consolidar informações de múltiplos rasters em um único arquivo, permitindo uma visão integrada de áreas que possuem corpos d'água. A média calculada é particularmente valiosa em estudos ambientais e de sensoriamento remoto que exigem análises temporais ou regionais. A automação do processo garante eficiência no tratamento de grandes volumes de dados.

Geração de gráficos

Os gráficos gerados permitem explorar os dados de forma abrangente e detalhada. Gráficos de linha temporal foram utilizados para evidenciar a evolução anual dos índices NDVI, NDWI e NDBI, destacando tendências gerais ao longo do período analisado. Histogramas e boxplots complementaram essa análise ao fornecer insights sobre a distribuição e a variabilidade dos valores médios, permitindo identificar padrões e outliers em diferentes anos. Essas representações foram enriquecidas pela aplicação da estimativa de densidade por kernel (KDE), que suavizou as distribuições e revelou padrões menos evidentes.

Gráficos de dispersão foram empregados para investigar relações entre os índices, como as interações entre vegetação e urbanização ou água e vegetação, fornecendo indícios sobre processos ambientais e antrópicos.

A automação do processamento e a diversidade de visualizações asseguraram eficiência e robustez na análise, mesmo diante de limitações, como lacunas de dados ou a granularidade temporal restrita a médias anuais. Essa abordagem combinou precisão analítica com representações intuitivas, contribuindo para o entendimento das transformações ambientais na bacia do Ribeirão Brandão e para a aplicação de estudos futuros em sensoriamento remoto e gestão ambiental.

Cálculo de médias anuais dos índices NDVI, NDWI e NDBI

O código apresentado (Anexo 2 *Código h*) analisa e visualiza dados de índices ambientais derivados de imagens de sensoriamento remoto, cobrindo o período de 2014 a 2024. Ele foca nos índices NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), NDWI (Índice de Água por Diferença Normalizada) e NDBI (Índice de

Construção por Diferença Normalizada). Esses índices são amplamente utilizados para monitorar mudanças ambientais e urbanas ao longo do tempo, sendo ferramentas essenciais em estudos de uso e ocupação do solo, recursos hídricos e urbanização. O objetivo principal do código é calcular as médias anuais de cada índice, organizar os dados em uma estrutura eficiente e gerar gráficos para interpretar visualmente os resultados.

O código processa os dados ao longo de vários passos. Primeiramente, ele organiza os dados em um dicionário, onde cada índice possui uma lista de valores médios anuais. Essa estrutura facilita a criação de visualizações. As médias anuais são extraídas usando a função `arcpy.GetRasterProperties_management`, que retorna a propriedade "MEAN" de cada raster. Os valores são convertidos de strings para floats, corrigindo possíveis incompatibilidades de formato (como a troca de vírgula por ponto). Essa abordagem permite lidar com grandes volumes de dados de forma eficiente, mantendo a precisão das análises.

Diversos gráficos são gerados para explorar os dados. O gráfico de linha temporal mostra a evolução da média anual de cada índice, permitindo identificar tendências, como o aumento ou redução da vegetação (NDVI) ou da urbanização (NDBI). Os histogramas, enriquecidos com uma curva KDE (Kernel Density Estimation), ilustram a distribuição dos valores médios, permitindo observar a frequência de diferentes faixas de valores. O uso da KDE é particularmente relevante, pois suaviza a distribuição e ajuda a identificar padrões que podem não ser evidentes em histogramas convencionais (Silverman, 1986).

Os boxplots são utilizados para visualizar a dispersão dos valores médios ao longo do tempo, destacando medianas, quartis e outliers. Eles são especialmente úteis para identificar anos atípicos, como aqueles que apresentam mudanças abruptas devido a eventos climáticos extremos ou alterações na cobertura do solo. Os gráficos de barras empilhadas mostram a proporção de classes de valores de índice (e.g., muito baixo, médio) para cada ano, ajudando a compreender como a composição das classes muda ao longo do tempo.

Além disso, o código gera gráficos de dispersão para explorar relações entre índices, como NDVI versus NDBI (vegetação versus urbanização) ou NDWI versus NDVI (água versus vegetação). Esses gráficos ajudam a identificar correlações que podem refletir interações ambientais ou processos de urbanização. No entanto, é

importante observar que correlação não implica causalidade, e análises adicionais podem ser necessárias para validar essas relações (Cohen, 1988).

Apesar da robustez do código, existem algumas limitações. Dados ausentes para determinados anos podem criar lacunas nas análises e gráficos, o que pode dificultar a identificação de tendências contínuas. Além disso, a granularidade temporal está restrita a médias anuais, o que pode mascarar variações sazonais importantes. Essas limitações podem ser abordadas em análises futuras, como a incorporação de dados sazonais ou o uso de métodos estatísticos para lidar com dados ausentes.

Em resumo, o código apresentado é uma ferramenta poderosa para a análise de índices ambientais e urbanísticos, quando há a necessidade de analisar um grande número de imagens. Ele integra métodos estatísticos e de visualização avançados para oferecer uma compreensão detalhada das mudanças no uso e ocupação do solo ao longo de uma década. O uso de gráficos variados, combinado com a precisão dos cálculos de índice, garante uma análise rica e detalhada, sendo uma contribuição significativa para estudos de sensoriamento remoto e monitoramento ambiental.

Cálculo de média mensal dos índices NDVI, NDBI e NDWI

O código apresentado (Anexo 2 Código i) implementa um sistema de análise e visualização de dados ambientais derivados de imagens de satélite, especificamente focado em índices como NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), NDWI (*Normalized Difference Water Index*) e NDBI (*Normalized Difference Built-up Index*).

Inicialmente, o código importa bibliotecas fundamentais para a análise, como os para manipulação de arquivos e diretórios, `arcpy` para processamento geoespacial, `matplotlib` e `seaborn` para visualização de dados, `pandas` para manipulação de dados tabulares e `numpy` para cálculos matemáticos e numéricos. Essas bibliotecas são bem documentadas na literatura acadêmica por sua robustez e versatilidade em aplicações científicas e de engenharia (Hunter, 2007; McKinney, 2010).

Na configuração inicial, são definidos os diretórios principais que organizam os dados de entrada e saída. O diretório `base_dir` armazena os arquivos raster classificados por índice, ano e mês, enquanto `analise_mensal_dir` é usado para armazenar os gráficos gerados. Esses índices e períodos de tempo são definidos no início do código, com o objetivo de processar uma série temporal completa de 2014 a 2024. A definição de intervalos temporais e a organização em índices refletem boas

práticas em análise de séries temporais geoespaciais, conforme sugerido por Lang *et al.* (2013).

O processamento dos dados raster ocorre através de uma iteração por anos e meses, verificando a existência de diretórios correspondentes. Arquivos raster que seguem um padrão de nomenclatura específico são selecionados, e as estatísticas do raster, como a média, são extraídas utilizando a função `arcpy.GetRasterProperties_management`. Esta etapa é crucial para obter dados resumidos que representem os padrões gerais de cada índice para análises subsequentes. A robustez do processamento é garantida por verificações de erro e tratamento de exceções, alinhando-se às recomendações de (Peng, 2011) para workflows científicos.

Os dados coletados são organizados em estruturas tabulares utilizando a biblioteca *pandas*, que permite operações como ordenação por ano e mês, além de cálculos adicionais necessários para a geração de gráficos. Cada índice tem seus dados organizados separadamente, assegurando a clareza e a organização para análises posteriores. Este uso do *pandas* reflete sua relevância em estudos científicos que demandam manipulação eficiente de tabelas e séries temporais (McKinney, 2010).

A etapa de visualização gera diferentes tipos de gráficos para explorar os padrões temporais e sazonais dos índices. Primeiramente, os gráficos de linha mostram a evolução das médias mensais ao longo do tempo. Curvas de tendência polinomiais são ajustadas utilizando a biblioteca *numpy*, uma abordagem eficaz para modelagem de séries temporais com variações cíclicas ou não-lineares (Shumway; Stoffer, 2017). Em seguida, são gerados histogramas acompanhados de estimativas de densidade Kernel (KDE), úteis para entender a distribuição dos dados e identificar padrões recorrentes (Silverman, 1986). O *boxplot* mensal permite a análise das variações interanuais, destacando anomalias e variações sazonais (Tukey, 1977).

Cada gráfico é salvo em um arquivo *.png* no diretório de saída, com nomes que indicam o índice e o tipo de visualização. Esta prática reforça a rastreabilidade e replicabilidade, essenciais em pesquisas científicas (Stodden *et al.*, 2012). O código é modular, organizado em blocos bem definidos e documentados, permitindo fácil adaptação para outros cenários de análise ambiental, como monitoramento de desmatamento, mudanças climáticas ou expansão urbana.

Em resumo, o código exemplifica uma aplicação robusta e replicável de análise de índices ambientais utilizando ferramentas geoespaciais e de análise de dados. Ele integra metodologias bem estabelecidas de processamento de dados raster, análise estatística e visualização científica, sendo uma ferramenta valiosa para estudos ambientais e de planejamento territorial.

5.7 Composição de bandas

A composição de bandas espectrais é um processo essencial em análises de sensoriamento remoto, pois permite combinar informações de diferentes comprimentos de onda em uma única imagem, criando composições coloridas que facilitam a interpretação visual. Este método é amplamente utilizado em estudos ambientais e de monitoramento de mudanças no uso e cobertura do solo, pois as imagens resultantes em cores reais ou falsas oferecem uma representação intuitiva dos dados, destacando variações na vegetação, corpos d'água e áreas urbanizadas (Lillesand *et al.*, 2015).

O código a ser apresentado foi desenvolvido com o objetivo de realizar a composição de bandas específicas de imagens Landsat 8, mais precisamente das bandas vermelho, verde e azul, para gerar composições no formato RGB. Além de permitir a criação de imagens visualmente compreensíveis, o código organiza o processamento de grandes volumes de dados, utilizando um fluxo automatizado que assegura eficiência e consistência nos produtos.

Ao longo do texto, será detalhado o funcionamento do código, desde a configuração inicial das bibliotecas e diretórios até a execução do processo de composição. A metodologia abrange a seleção automatizada de bandas relevantes, a aplicação de procedimentos de composição e a geração de saídas organizadas por ano e mês. Além disso, o sistema registra logs detalhados, promovendo o rastreamento do progresso e a identificação de possíveis erros.

Este procedimento, ao integrar ferramentas de programação com a robustez do ArcGIS, exemplifica uma abordagem eficiente para o processamento de dados geoespaciais. A seguir, serão apresentados os detalhes técnicos, a lógica de implementação e os resultados esperados, demonstrando como este método pode ser aplicado em estudos ambientais e análises temporais de mudanças na paisagem.

Código utilizado para realizar a composição de bandas

O código desenvolvido (Anexo 2 Código j) tem como objetivo realizar a composição de bandas espectrais específicas (vermelho, verde e azul) de imagens Landsat, para gerar composições coloridas no formato RGB. Este processo é fundamental em análises de sensoriamento remoto, pois permite criar imagens em cores reais que facilitam a interpretação visual, sobretudo em estudos de uso e cobertura do solo, monitoramento ambiental e mudanças climáticas (Lillesand *et al.*, 2015).

O código começa com a importação das bibliotecas necessárias. A biblioteca `os` é usada para manipulação de diretórios e arquivos, permitindo que o código navegue pelas pastas de entrada e salve as saídas em locais específicos. A biblioteca `arcpy` fornece ferramentas GIS para processar dados geoespaciais no ambiente ArcGIS, sendo essencial para tarefas como composição de bandas. Por último, a biblioteca `logging` é utilizada para criar logs que documentam o progresso do processamento, registrando eventos importantes, erros ou avisos (Beazley; Jones, 2013).

Na sequência, configura-se o sistema de *logging* para exibir mensagens detalhadas no console, incluindo informações sobre o tempo de execução e o nível do log (INFO, WARNING ou ERROR). Essa etapa é importante para o acompanhamento em tempo real do processamento, permitindo identificar rapidamente possíveis problemas. Além disso, define-se o ambiente do ArcGIS para sobrescrever automaticamente arquivos existentes, evitando interrupções causadas por duplicidade de saídas.

Os diretórios de entrada e saída são definidos como variáveis `base_dir` e `output_dir`, respectivamente. O diretório de entrada contém as imagens Landsat organizadas por ano, enquanto o diretório de saída é onde os resultados da composição serão salvos. A função `os.makedirs` garante que o diretório de saída seja criado se não existir, promovendo robustez e organização no processamento.

As bandas espectrais específicas para composição (B4, B3 e B2) são mapeadas como vermelho, verde e azul. Essa seleção é baseada no padrão do Landsat 8, onde a banda 4 representa o espectro do vermelho, a banda 3 o espectro do verde e a banda 2 o azul. Essa combinação é amplamente utilizada para criar imagens em cores reais, que auxiliam na interpretação visual dos dados de sensoriamento remoto (Richards; Jia, 2006).

O código utiliza a função `encontrar_bandas` para localizar as bandas necessárias dentro de um diretório específico. Essa função percorre os arquivos da pasta, identifica aqueles cujo nome contém os códigos das bandas desejadas e retorna um dicionário com os caminhos completos dessas bandas. Caso alguma banda não seja encontrada, a composição não é realizada, e uma mensagem de aviso é registrada.

Uma segunda função, `extrair_ano_mes`, é utilizada para identificar o ano e o mês das imagens Landsat com base no nome do arquivo. Isso é feito ao procurar por strings com o formato AAAAMMDD, padrão nos nomes dos arquivos Landsat. Essas informações são extraídas para nomear os arquivos de saída de forma organizada, associando cada composição ao seu respectivo período temporal.

A função principal, `composição_bandas`, realiza a composição propriamente dita. Ela utiliza o método `CompositeBands_management` da biblioteca `arcpy` para combinar as bandas de vermelho, verde e azul em um único arquivo TIFF. Antes de realizar a composição, a função verifica se todas as três bandas estão disponíveis. Caso contrário, registra um aviso no log. Se a composição for bem-sucedida, o caminho do arquivo gerado é exibido no console.

Por fim, o código percorre todos os arquivos TIFF no diretório de entrada, identificando as bandas de cada conjunto de dados e chamando as funções apropriadas para processar e salvar os resultados. Cada composição gerada recebe um nome que inclui o ano e o mês da imagem processada, garantindo uma organização temporal clara.

Este código é um exemplo robusto de automação de processamento de imagens de sensoriamento remoto. Ele promove eficiência na manipulação de grandes volumes de dados e garante padronização nos produtos gerados, contribuindo para estudos ambientais e análise de mudanças no uso e cobertura do solo. A integração entre Python e ArcGIS demonstra a versatilidade dessas ferramentas para lidar com dados geoespaciais complexos.

5.8 Mapeamento de cobertura e uso da terra

A partir dessas imagens recortadas, procedeu-se ao mapeamento de uso e cobertura da terra propriamente dito. Inicialmente, foram definidas, para cada uma das datas (2014 e 2024), áreas de treinamento representativas das classes de interesse, com base na interpretação visual das composições coloridas Landsat, nas respostas

espectrais dos pixels e no apoio de imagens de maior resolução espacial disponíveis em plataformas online. Essas amostras foram distribuídas de forma a cobrir a variabilidade interna de cada classe na bacia (diferentes tons de vegetação, distintos tipos de solo exposto e padrões de ocupação urbana), evitando concentrações excessivas em um único setor.

Com as amostras definidas, foi realizada uma classificação supervisionada, utilizando um classificador do tipo máquina de vetores de suporte (Support Vector Machine – SVM), em ambiente SIG. O algoritmo foi aplicado separadamente para as cenas de 2014 e 2024, empregando as bandas espectrais mais adequadas para discriminar os alvos de interesse (visível, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas), além dos índices espectrais já calculados quando pertinente. O resultado desse procedimento foi a geração de dois mapas temáticos de uso e cobertura da terra, um para cada ano, com resolução espacial compatível à das imagens Landsat.

As classes de uso e cobertura foram posteriormente reagrupadas em quatro categorias principais, de modo a refletir os padrões estruturais mais relevantes para a análise geomorfológica e para a leitura dos Estilos de Rio: vegetação arbórea, vegetação rasteira, solo exposto e áreas urbanas. A classe “vegetação arbórea” engloba remanescentes de mata e formações arbóreas densas ou em estágios mais avançados de regeneração; a “vegetação rasteira” abrange pastagens e coberturas herbáceas; o “solo exposto” corresponde a áreas desnudas associadas a movimentação de terras, cortes e aterros, taludes e superfícies pouco ou nada cobertas por vegetação; por fim, a classe “urbano” inclui superfícies edificadas, vias pavimentadas e demais elementos construídos.

Após a classificação, foram aplicados procedimentos básicos de pós-processamento, incluindo filtragem espacial para redução de ruídos (remoção de manchas isoladas incompatíveis com a escala de análise) e correção pontual de pixels mal classificados com base na verificação visual. A qualidade dos mapas resultantes foi avaliada por meio de comparação entre os rótulos atribuídos pelo classificador e pontos de controle independentes, gerando um índice de acurácia global em torno de 0,8, considerado adequado para o nível de detalhe e a escala do estudo. Esses mapas de uso e cobertura da terra de 2014 e 2024 constituíram a base para o cálculo das matrizes de transição entre classes, bem como para a interpretação integrada com os

índices NDVI, NDWI e NDBI/BUI na análise das trajetórias de transformação da paisagem na bacia do Ribeirão Brandão e no Ribeirão Curral Leste.

6. RESULTADOS

6.1. Modificações na cobertura e uso da terra no período 2014-2024

No intuito de avaliar as modificações ocorridas na bacia hidrográfica do rio Ribeirão Brandão para o período 2014-2024, geramos dois mapas de classificação de cobertura e uso da terra, um referente ao ano de 2014 e outro referente ao ano de 2024. Ao realizar a classificação supervisionada, obteve-se o valor do índice Kappa de 0,808, o que indica um desempenho muito satisfatório do modelo utilizado. Esse índice mede a acurácia global da classificação ao comparar os *pixels* classificados pelo algoritmo com as amostras de referência, variando de -1 a 1. Valores inferiores a 0,4 representam classificações fracas, entre 0,41 e 0,60 classificações moderadas, entre 0,61 e 0,80 classificações boas e acima de 0,81 classificações excelentes.

Assim, o resultado alcançado situa-se no limite superior da faixa considerada boa, aproximando-se da excelência, o que demonstra que o método aplicado, possivelmente o classificador de máxima verossimilhança (*Maximum Likelihood*), reproduziu com elevada fidelidade as amostras de treinamento. Em termos práticos, isso significa que há baixo grau de confusão entre as classes mapeadas e que o produto gerado apresenta confiabilidade estatística, sendo adequado para análises comparativas e temporais relacionadas ao uso e cobertura da terra, bem como para a interpretação de índices espectrais como NDVI, NDWI e NDBI.

A bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão possui área de aproximadamente 79,18 km², equivalentes a 7.917,6 ha, e perímetro em torno de 58,14 km. Em 2014, a classe predominante era a vegetação rasteira, que ocupava 4.889,43 ha, o que corresponde a cerca de 61,75% da área da bacia. Em seguida, destacavam-se as áreas arborizadas, com 1.794,96 ha (aproximadamente 22,67%), o solo exposto, com 627,21 ha (7,92%), e as áreas urbanas com edificações, que somavam 603,90 ha (cerca de 7,63%) da área total (Figura 12).

Em 2024, a vegetação rasteira permanece como a classe de maior expressão espacial, porém com redução para 4.258,44 ha, o que representa cerca de 53,78% da bacia e configura uma perda de 630,99 ha em relação a 2014 (variação de -12,91%). Paralelamente, observa-se um aumento muito acentuado do solo exposto, que passa a ocupar 1.021,77 ha (12,91% da área da bacia), indicando um acréscimo de 394,56

ha, ou 62,91% de crescimento nessa classe. As áreas arborizadas também apresentam incremento, atingindo 1.971,81 ha (24,90%), com ganho de 176,85 ha (9,85%). As áreas urbanas com edificações, por sua vez, ampliam-se para 664,11 ha (8,39%), o que corresponde a um aumento de 60,21 ha, ou 9,97% em relação a 2014.

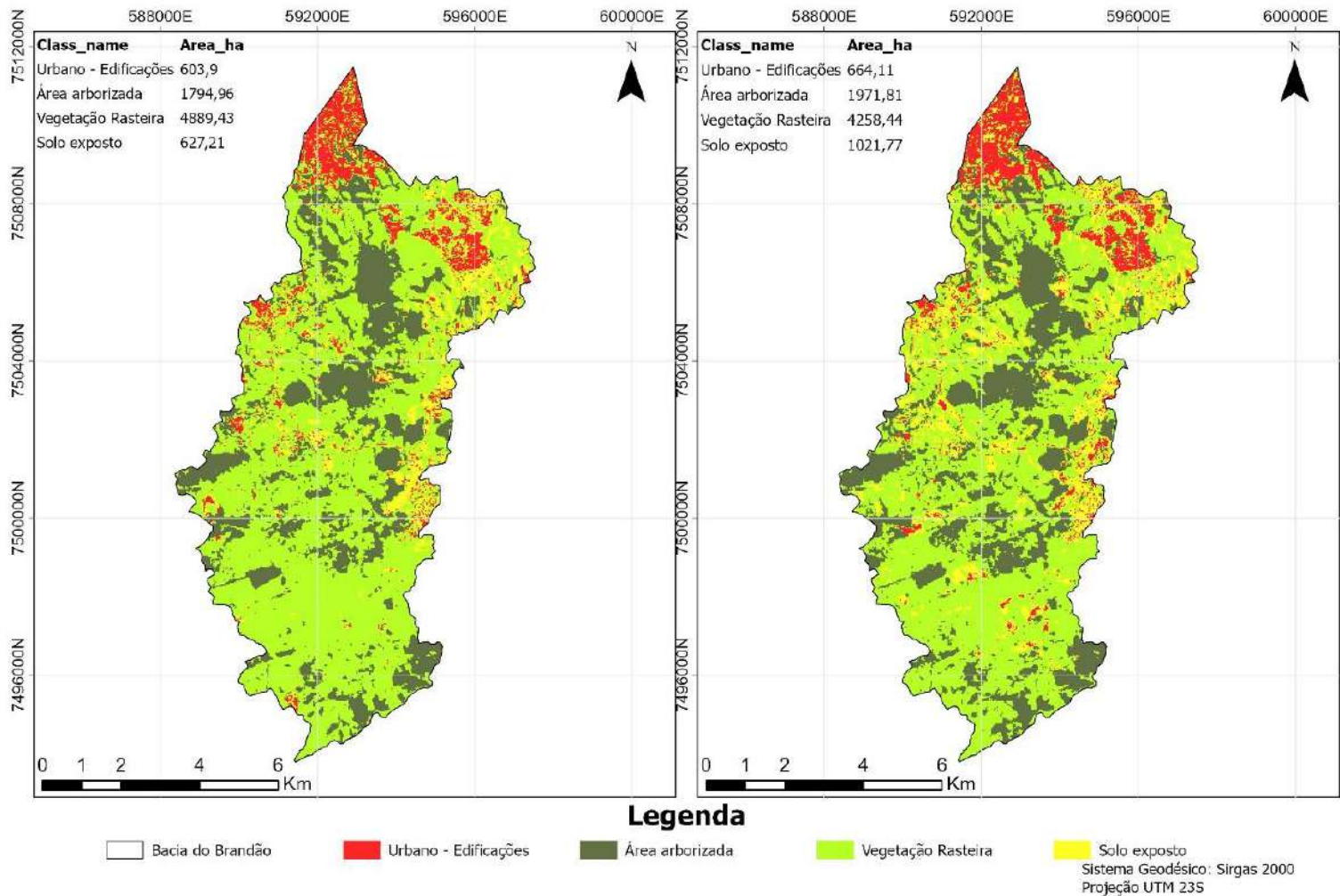
Esses resultados evidenciam, em primeiro lugar, um aumento extremo das superfícies classificadas como solo exposto, em paralelo a uma redução significativa da vegetação rasteira. Em segundo lugar, nota-se um crescimento das áreas arborizadas e das áreas urbanizadas, ainda que, proporcionalmente, a expansão de edificações urbanas seja a menos expressiva entre as mudanças observadas. Do ponto de vista espacial, a expansão de áreas urbanizadas e arborizadas ocorre sobretudo na porção sul da bacia, onde surgem novos núcleos urbanizados e ocupações de menor densidade associadas a cultivos arbóreos e loteamentos arborizados. Já na região central da bacia, em torno da Floresta da Cicuta, a classe de área arborizada se mantém relativamente contínua, embora existam indícios de fragmentação e redução local da cobertura em alguns trechos.

Tabela 1 - Matriz de transição entre as classes de 2014 e 2024 para a bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão.

Classe	Área 2014 (ha)	% 2014*	Área 2024 (ha)	% 2024*	Variação (ha)	Variação (%)
Urbano- Edificações	603,90	7,63	664,11	8,39	60,21	9,97
Área arborizada	1.794,96	22,67	1.971,81	24,90	176,85	9,85
Vegetação rasteira	4.889,43	61,75	4.258,44	53,78	-630,99	-12,91
Solo exposto	627,21	7,92	1.021,77	12,91	394,56	62,91
Total da bacia	7.917,60	100	7.917,60	100	—	—

Figura 12 - Mapa de cobertura e uso da terra da bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão - anos de 2014 e 2024

Uso e ocupação da terra entre 2014 e 2024



Os dados apresentados na Tabela 1 permitem observar as transições entre quatro classes de cobertura do solo utilizadas o para um período de 10 anos (Área arborizada, Vegetação rasteira, Solo exposto e Urbano-edificações). Para cada classe foi organizada uma matriz de mudanças, onde a 1ª coluna as linhas representa a classe de origem e a 2ª coluna as classes de destino para cada classe de origem. Valores expressos em hectares (ha) representam a extensão de área que mudou de uma classe para outra ou permaneceu inalterada (*"No change"*).

A matriz de transição entre as classes de 2014 e 2024 (Tabela 1) permite a compreensão desses padrões de mudança, ao evidenciar os principais caminhos de conversão do uso e cobertura da terra no período analisado. Embora a maior parte da bacia permaneça na mesma classe entre os dois anos, as transições destacadas revelam a lógica interna dos processos de degradação, revegetação e urbanização.

No que se refere ao solo exposto (Figura 13), pela relação área/contagem (0,09 ha por pixel), trata-se de dados compatíveis com resolução de 30 m (Landsat), em que cada pixel representa 900 m². Somando as quatro linhas, o solo exposto em 2014 totaliza 627,21 ha (6.969 pixels) na área analisada.

Do total originalmente mapeado como solo exposto, 320,22 ha (51,05%) permanecem como solo exposto em 2024, indicando elevada persistência espacial dessa condição ao longo da década. Em contrapartida, 48,95% (306,99 ha) do solo exposto de 2014 foi convertido para outras classes, o que evidencia forte dinamismo dessa categoria, coerente com seu caráter frequentemente transitório (ex.: áreas em obras, clareamentos, superfícies degradadas ou solos desnudos por manejo/erosão).

Entre as conversões, destacam-se dois fluxos principais. O maior é a passagem de solo exposto para vegetação rasteira, com 160,47 ha (25,58% do solo exposto original), sugerindo processos de revegetação e estabilização superficial (regeneração de pastagens, abandono de áreas degradadas, recomposição herbácea ou variações de manejo e sazonalidade). O segundo fluxo, muito expressivo, é a conversão de solo exposto para urbano – edificações, com 136,80 ha (21,81%), que pode ser interpretada como consolidação de ocupações sobre superfícies previamente desnudas (por exemplo, áreas preparadas/terraplenadas que se tornam impermeabilizadas e edificadas). Já a conversão direta para área arborizada é residual (9,72 ha; 1,55%), compatível com uma transição mais lenta e espacialmente restrita (sucessão/plantios pontuais), ou com limitações de detecção em mosaicos heterogêneos na escala do pixel.

Em termos de implicações geomorfológicas, o padrão combinado “persistência + conversão para urbano” tende a sinalizar manutenção/expansão de superfícies com maior potencial de geração de escoamento superficial e aporte de sedimentos (especialmente durante fases intermediárias de urbanização)

A vegetação rasteira (Figura 14), desempenha papel importante na reconfiguração recente da paisagem, por constituir a classe dominante em 2014 e, simultaneamente, a principal “fonte” de conversão para outras classes na matriz de transição. Do total de 4.889,43 ha inicialmente classificados como vegetação rasteira, 3.839,49 ha permaneceram sem mudança até 2024 (48,51% da área da bacia e 78,53% da classe de origem), evidenciando a permanência de uma matriz campestre extensa, ainda que sujeita a pressões localizadas. Entre as conversões, destaca-se a transição para solo exposto, que totaliza 540,09 ha (6,82% da bacia e 11,04% da classe), indicando remoção de cobertura e intensificação de processos associados à degradação superficial, terraplanagens e abertura de áreas. Em seguida, 378,63 ha (4,78% da bacia e 7,75% da classe) foram convertidos para área arborizada, sugerindo adensamento estrutural da cobertura vegetal em setores específicos, seja por regeneração natural, seja por implantação de cultivos arbóreos e arborização vinculada a usos periurbanos. Por fim, 131,22 ha (1,66% da bacia e 2,68% da classe) passaram a urbano—edificações, o que sinaliza frentes de expansão urbana incidindo sobre áreas previamente ocupadas por pastagens e/ou vegetação herbácea.

As transições envolvendo diretamente a classe área arborizada (Figura 15) e o uso urbano com edificações são quantitativamente menores quando comparadas às mudanças observadas na vegetação rasteira, mas são particularmente informativas sobre a dinâmica de fragmentação e rearranjo da cobertura vegetal em contexto periurbano. Do total de 1.794,96 ha mapeados como área arborizada em 2014, 1.571,58 ha permaneceram sem mudança até 2024, o que corresponde a 19,83% da área da bacia e a 87,55% da classe de origem, indicando predominância de manutenção dos remanescentes arbóreos ao longo da década. Ainda assim, houve conversões relevantes: 196,65 ha foram transformados em vegetação rasteira (2,48% da bacia; 10,95% da classe), sugerindo perda de densidade/estrutura arbórea e transição para coberturas mais abertas, compatível com processos de supressão seletiva, abertura de clareiras, manejo de usos rurais e fragmentação.

Figura 13: Transformações da classe solo exposto entre 2014 e 2024 na bacia do Ribeirão Brandão.

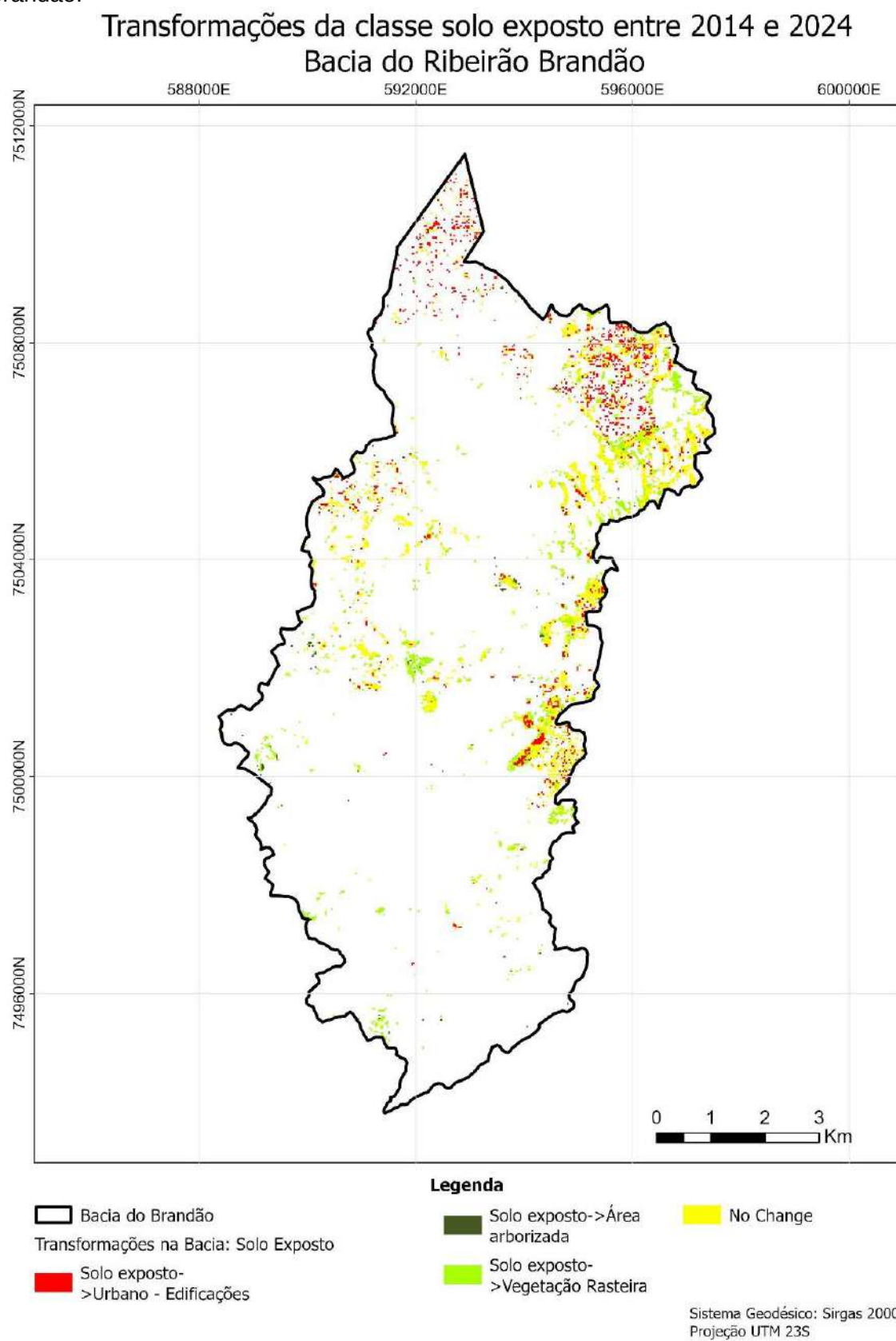
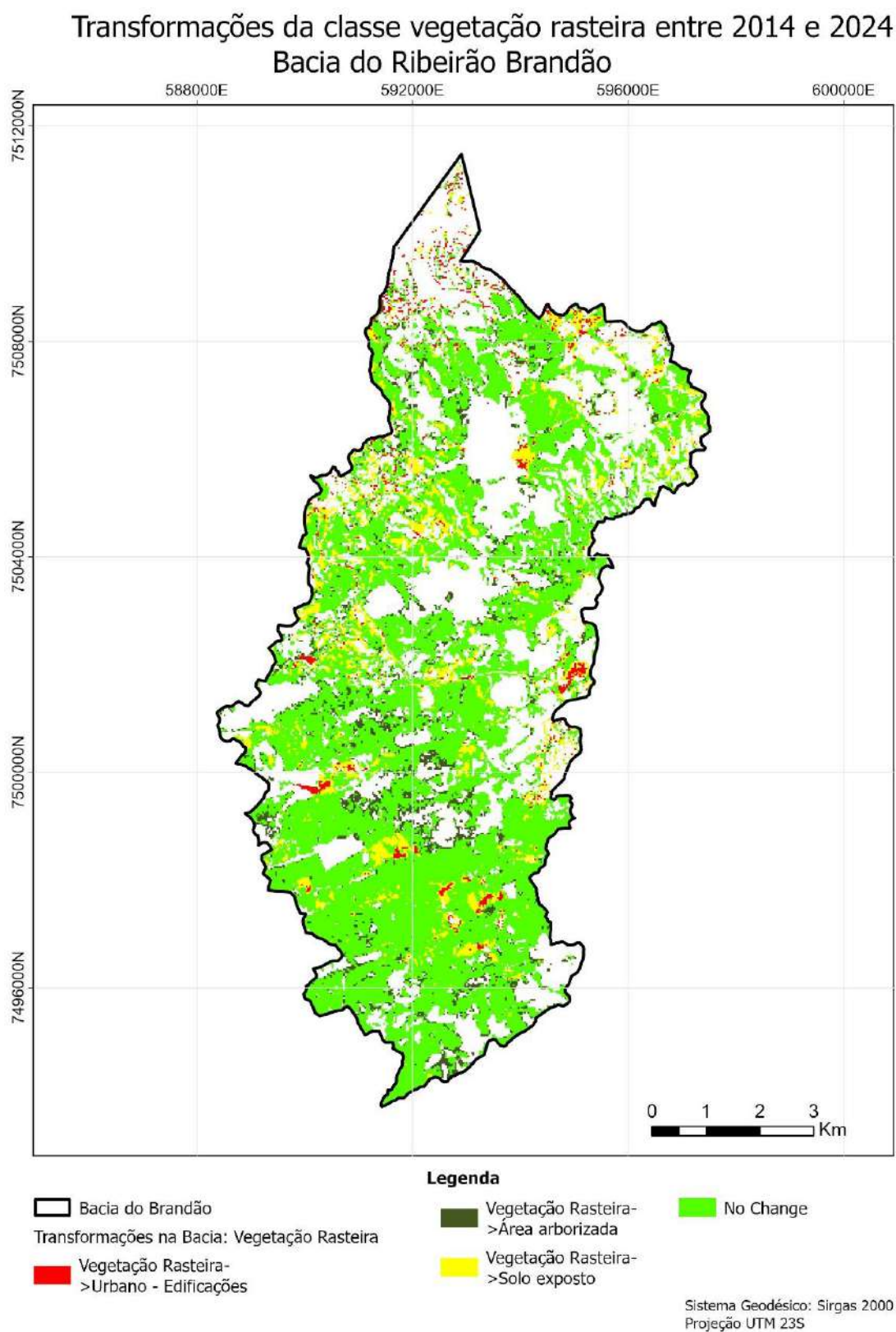


Figura 14: Transformações da classe vegetação rasteira entre 2014 e 2024 na bacia do Ribeirão Brandão.



Além disso, 14,13 ha passaram para urbano—edificações (0,18% da bacia; 0,79% da classe), evidenciando que a conversão direta de cobertura arbórea para ocupação construída ocorre de modo pontual, porém material, associada a frentes localizadas de expansão e consolidação urbana. Por fim, 12,60 ha foram convertidos em solo exposto (0,16% da bacia; 0,70% da classe), indicando intervenções recentes e superfícies desnudas que podem anteceder novos usos (incluindo expansão urbana) ou refletir movimentação de terra e degradação superficial em áreas anteriormente arborizadas.

Quando esses fluxos são analisados em conjunto com os mapas de 2014 e 2024, confirma-se a lógica gradual de transformação da cobertura: a vegetação rasteira funciona como classe intermediária, sendo simultaneamente a principal fonte do aumento de solo exposto (processos de degradação ou preparo do solo para implantação de edificações) e um dos pontos de partida para o adensamento em área arborizada e a instalação de novas áreas urbanizadas.

Ainda que a expansão proporcional das áreas urbanas com edificações seja a menos expressiva entre as mudanças observadas (Figura 16), ela se insere em um contexto mais amplo de reorganização da matriz de uso e cobertura da terra, marcado pela redução da vegetação rasteira, aumento de solo exposto e fragmentação de remanescentes arbóreos, com implicações diretas para a dinâmica e a condição geomorfológica dos sistemas fluviais da bacia do Ribeirão Brandão.

É importante ponderar, entretanto, que uma parte do aumento de área arborizada identificado na classificação pode estar associada às limitações inerentes à resolução espacial das imagens Landsat 8 (30 m), e não necessariamente a processos efetivos de recuperação florestal. Em contextos de ocupação fragmentada, como áreas urbanas de baixa densidade, bordas de fragmentos florestais e mosaicos agropecuários, um único *pixel* tende a integrar diferentes elementos da paisagem (árvores isoladas, gramíneas, solo exposto, edificações), resultando em respostas espectrais mistas.

Figura 15: Transformações da classe área arborizada entre 2014 e 2024 na bacia do Ribeirão Brandão.

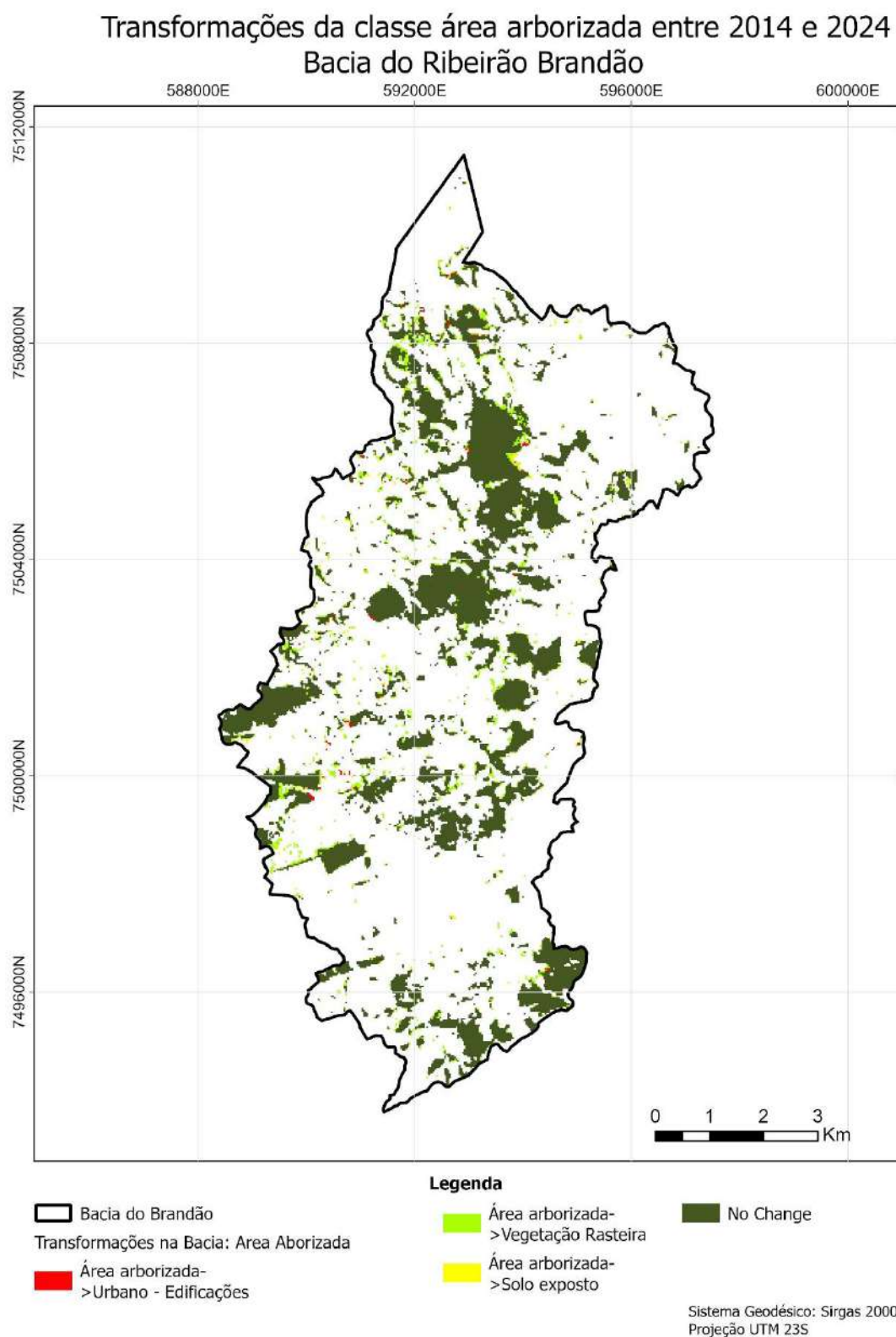
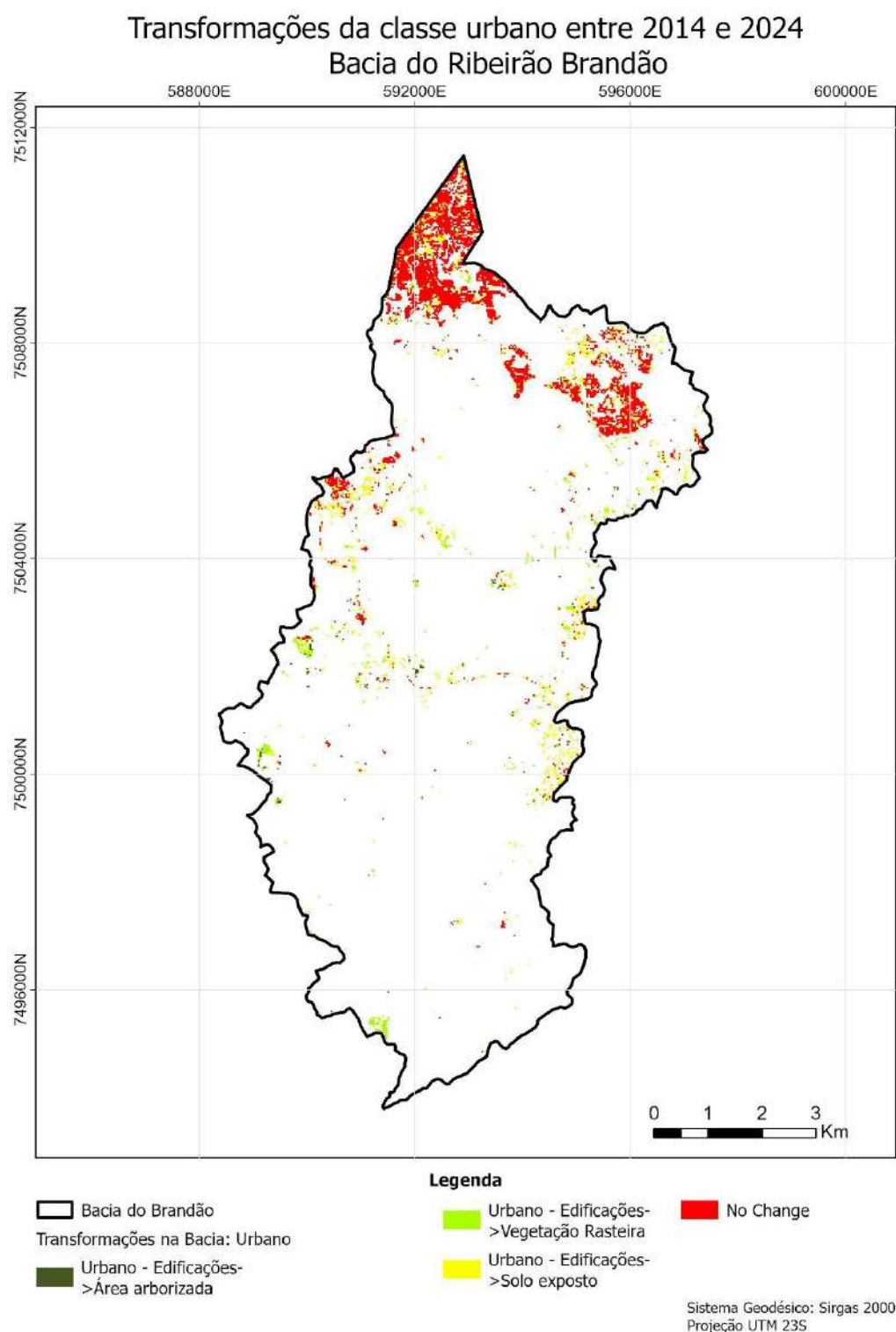


Figura 16: Transformações da classe urbano-edificações entre 2014 e 2024 na bacia do Ribeirão Brandão.



Em 2024, pequenas mudanças na configuração dessas superfícies, como o sombreamento de edificações por árvores, o adensamento pontual de indivíduos arbóreos ou alterações no manejo de pastagens – podem fazer com que determinados pixels passem a ser classificados como “área arborizada”, ainda que, do ponto de vista estrutural, não haja um ganho substantivo em termos de continuidade ou qualidade da cobertura florestal. Por essa razão, os incrementos de área arborizada observados devem ser interpretados com cautela e, idealmente, confrontados com dados de maior resolução espacial ou informações de campo.

No entanto, essa limitação não compromete o valor da análise aqui desenvolvida, cujo objetivo central é aplicar os índices NDVI, NDWI e NDBI derivados de imagens Landsat 8 para identificar padrões e tendências de mudança na cobertura e uso da terra que permitam a construção de diagnósticos complementares sobre as trajetórias de transformação dos sistemas fluviais na bacia do Ribeirão Brandão e em sua sub-bacia do Córrego do Curral-Leste, mais do que quantificar de forma exata cada hectare de cobertura florestal recuperada ou não.

Observando-se as transições entre tipos de cobertura e uso da terra para a sub-bacia do Córrego do Curral-Leste (Tabela 2), analisada em função de localizar-se em torno de um dos principais eixos de crescimento urbano de Volta Redonda nas duas últimas décadas, a leitura conjunta dos mapas de transformação das classes área arborizada, solo exposto, urbano-edificações e vegetação rasteira (Figura 17, Figura 18, Figura 19 e Figura 20) evidencia que a sub-bacia do Córrego do Curral-Leste se configura como um espaço fortemente marcado pela dinâmica de mudança entre as classes em direção ao uso urbano.

A vegetação rasteira permanece como a matriz dominante em 2014 e 2024, mas sofre mudanças de uso significativas em diversos setores, sobretudo nas encostas e interflúvios da área central da bacia, onde essa classe é substituída por solo exposto ou por novas áreas urbanizadas, enquanto em outros locais ela absorve áreas previamente classificadas como solo exposto.

O solo exposto, por sua vez, apresenta comportamento típico de classe transitória. Há numerosos *pixels* que, partindo de solo exposto em 2014, evoluem para vegetação rasteira ou mesmo para área arborizada em 2024, sugerindo episódios de revegetação e/ou mudanças no manejo agropecuário. Entretanto, há também um contingente expressivo de áreas que permanecem como solo exposto ou se

convertem em urbano-edificações, o que indica a permanência de superfícies desnudas associadas a abertura de vias, lotes e áreas de uso intensivo.

A classe urbano-edificações se concentra principalmente no setor central e sudoeste da sub-bacia, onde os pixels classificados como “sem mudança” formam um núcleo urbano relativamente consolidado. A partir desse núcleo, observam-se frentes de expansão urbana em direção às encostas vizinhas, sobretudo sobre áreas anteriormente ocupadas por vegetação rasteira e solo exposto. Em contraste, as áreas arborizadas tendem a se localizar de forma mais fragmentada, associadas tanto a pequenos remanescentes de vegetação quanto a cultivos arbóreos e áreas urbanas arborizadas de baixa densidade. Uma parcela desses fragmentos se mantém estável ao longo da década, enquanto outra parte é convertida em vegetação rasteira, solo exposto ou em manchas urbanas.

Em síntese, o padrão que se delineia para o Curral-Leste é o de uma sub-bacia em que: (i) a vegetação rasteira funciona como classe intermediária e altamente dinâmica, alimentando tanto o aumento de solo exposto quanto o adensamento arbóreo e a expansão urbana; (ii) o solo exposto aparece como indicador de pressão antrópica recente, associada à abertura de novas áreas para implantação de edificações ou à degradação de pastagens; e (iii) as áreas arborizadas e urbanas de baixa densidade se distribuem de forma fragmentada, compondo um mosaico que combina processos de ocupação, substituição de cobertura e, em menor escala, revegetação. Esses padrões têm implicações diretas para a produção de escoamento superficial e a geração de sedimentos para a rede de drenagem, afetando também a conectividade hidrológica, elementos centrais para a leitura das trajetórias de transformação dos sistemas fluviais na lógica do River Styles®.

A construção das matrizes de conversão possibilitou, assim, verificar se existem etapas dentro dos processos de modificação que levem à degradação dos solos, tendo assim potencial de produzir alterações nos sistemas fluviais. A identificação de condições de degradação progressiva dos solos é fundamentada em processos ambientais conhecidos: quando as florestas são removidas para dar lugar a cultivos ou pastagens, os solos ficam geralmente mais expostos devido à perda do recobrimento arbóreo, tornando-se mais suscetíveis aos processos erosivos relacionados aos fluxos hídricos superficiais.

Tabela 2: Transições entre classes de cobertura e uso da terra, expressos em valores em área (ha) e como percentual em relação à área da classe de origem na sub bacia do Córrego do Curral-Leste, Volta Redonda (RJ).

Classe de origem	Classe de destino	Área (ha)	% em relação à classe de origem
Área arborizada	Vegetação rasteira	5,31	9,1 %
	Solo exposto	1,08	1,9 %
	Urbano – edificações	0,27	0,5 %
	No change	51,48	88,5 %
Vegetação rasteira	Solo exposto	85,50	20,9 %
	Urbano – edificações	15,75	3,9 %
	Área arborizada	20,43	5,0 %
	No change	287,01	70,2 %
Solo exposto	Urbano – edificações	58,77	23,2 %
	Vegetação rasteira	58,59	23,2 %
	Área arborizada	1,62	0,6 %
	No change	134,01	53,0 %
Urbano – edificações	Solo exposto	41,94	26,7 %
	Vegetação rasteira	8,73	5,6 %
	Área arborizada	2,25	1,4 %
	No change	104,22	66,3 %

Transformações da classe área arborizada

No mapa de transformações da classe *área arborizada* (Figura 17), a maior parte dos pixels em verde escuro corresponde a áreas que permaneceram arborizadas entre 2014 e 2024, o que indica uma certa estabilidade de fragmentos arbóreos localizados principalmente no setor sul e em porções pontuais das bordas oeste e leste da sub-bacia. Esses remanescentes tendem a se associar a encostas mais íngremes e cabeceiras de drenagem, onde a ocupação urbana é menos intensa e a substituição por pastagens é relativamente mais restrita.

As mudanças a partir da classe *área arborizada* são mais pontuais, mas ajudam a revelar pressões específicas. Pixels em amarelo indicam transições de área arborizada para solo exposto, sugerindo episódios de supressão recente da cobertura arbórea, abertura de clareiras ou preparo de áreas para novos usos (como loteamentos, acessos ou áreas agropecuárias). Já as áreas em verde claro representam conversões de área arborizada para vegetação rasteira, o que pode estar relacionado tanto à degradação de capoeiras e bordas de fragmentos florestais, com simplificação estrutural da vegetação, quanto ao manejo de áreas anteriormente mais arborizadas que passaram a ser utilizadas como pastagens. Pixels em vermelho, que

indicam conversão direta de área arborizada para urbano – edificações, são numericamente pouco expressivos, mas revelam a ocorrência de supressão localizada de vegetação arbórea para implantação de edificações ao longo das bordas do núcleo urbano.

Assim, embora a classe área arborizada apresente núcleos relativamente estáveis no interior da sub-bacia, o mapa evidencia processos localizados de perda e fragmentação dessa cobertura, sobretudo em áreas de transição entre encostas e superfícies mais suavizadas, onde a urbanização e o uso agropecuário avançam sobre os remanescentes vegetados.

O mapa de transformações da classe vegetação rasteira (Figura 18) confirma o papel dessa classe como matriz paisagística dominante e altamente dinâmica no Curral-Leste. Os pixels em verde-claro indicam áreas de vegetação rasteira que se mantiveram ao longo da década, formando um contínuo que recobre grande parte das encostas e interflúvios, sobretudo nas porções central e sul da sub-bacia.

As mudanças a partir da vegetação rasteira são, contudo, significativas. Pixels em amarelo representam a conversão de vegetação rasteira para solo exposto, distribuídos ao longo das encostas, em especial nas proximidades do núcleo urbano e de vias de circulação. Esses padrões sugerem processos de degradação de pastagens, sobrepastoreio, compactação do solo e abertura de áreas para novos usos, ampliando a susceptibilidade à erosão e ao transporte de sedimentos.

Os *pixels* em vermelho indicam transições de vegetação rasteira para urbano-edificações, concentradas sobretudo na interface entre a matriz de pastagens e o núcleo urbano central e sudoeste. Essa leitura é coerente com um processo de expansão urbana em áreas de cobertura herbácea. Por fim, os *pixels* em verde escuro correspondem à conversão de vegetação rasteira em área arborizada, presentes de forma mais localizada, principalmente em setores sul e sudoeste. Essas transições podem estar associadas tanto a processos de regeneração natural, com adensamento gradual da vegetação, quanto à implantação de cultivos arbóreos e à arborização de áreas próximas a empreendimentos urbanos de menor densidade de edificações.

Em conjunto, o mapa mostra que a vegetação rasteira funciona como uma classe importante na trajetória de transformação da sub-bacia: é a partir dela que se intensificam tanto os processos de degradação (via solo exposto) quanto os processos de urbanização.

Figura 17 – Transformações da classe área arborizada entre 2014 e 2024 na sub bacia do Curral-Leste, tributário do Ribeirão Brandão.

Transformações da classe área arborizada entre 2014 e 2024

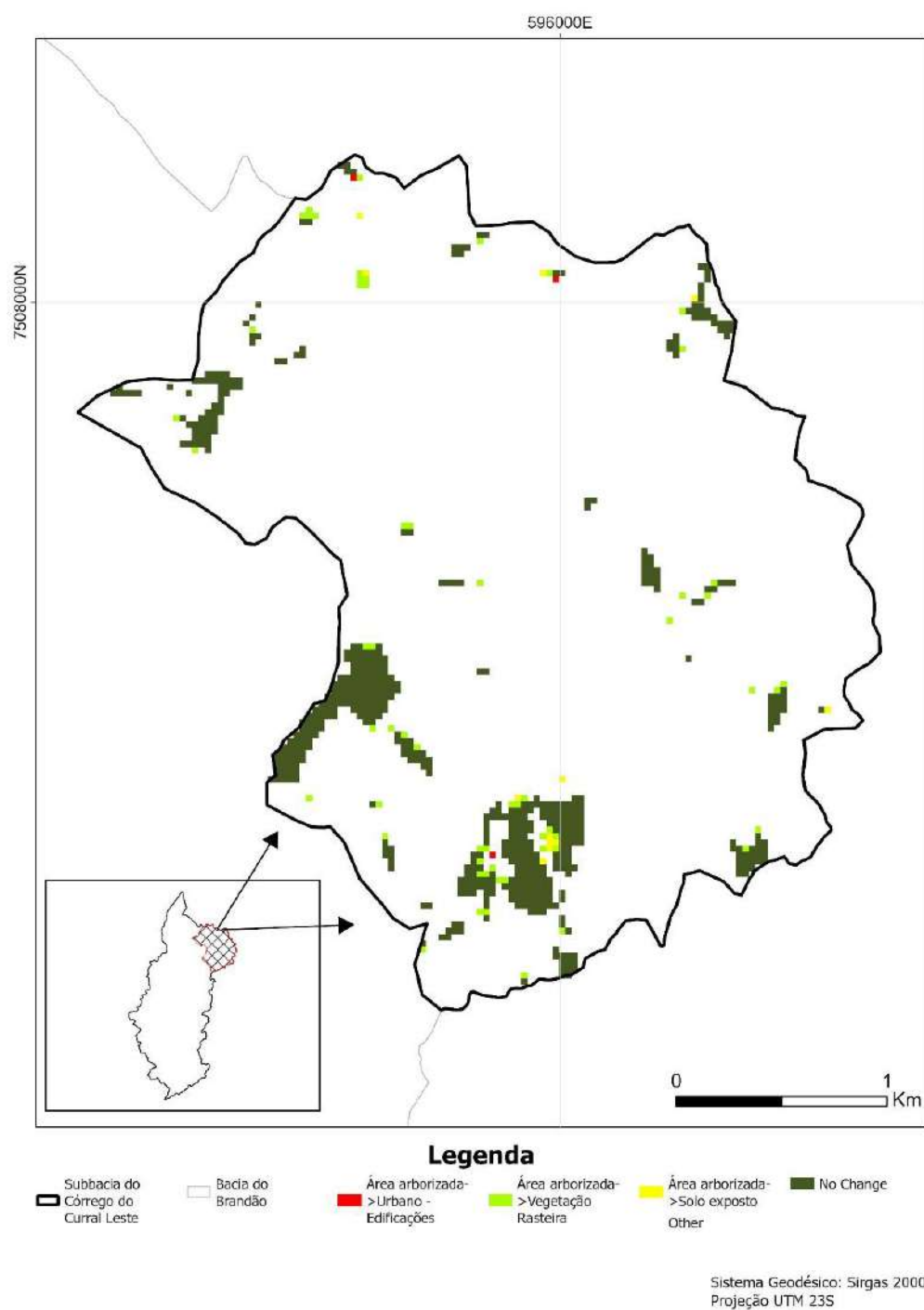
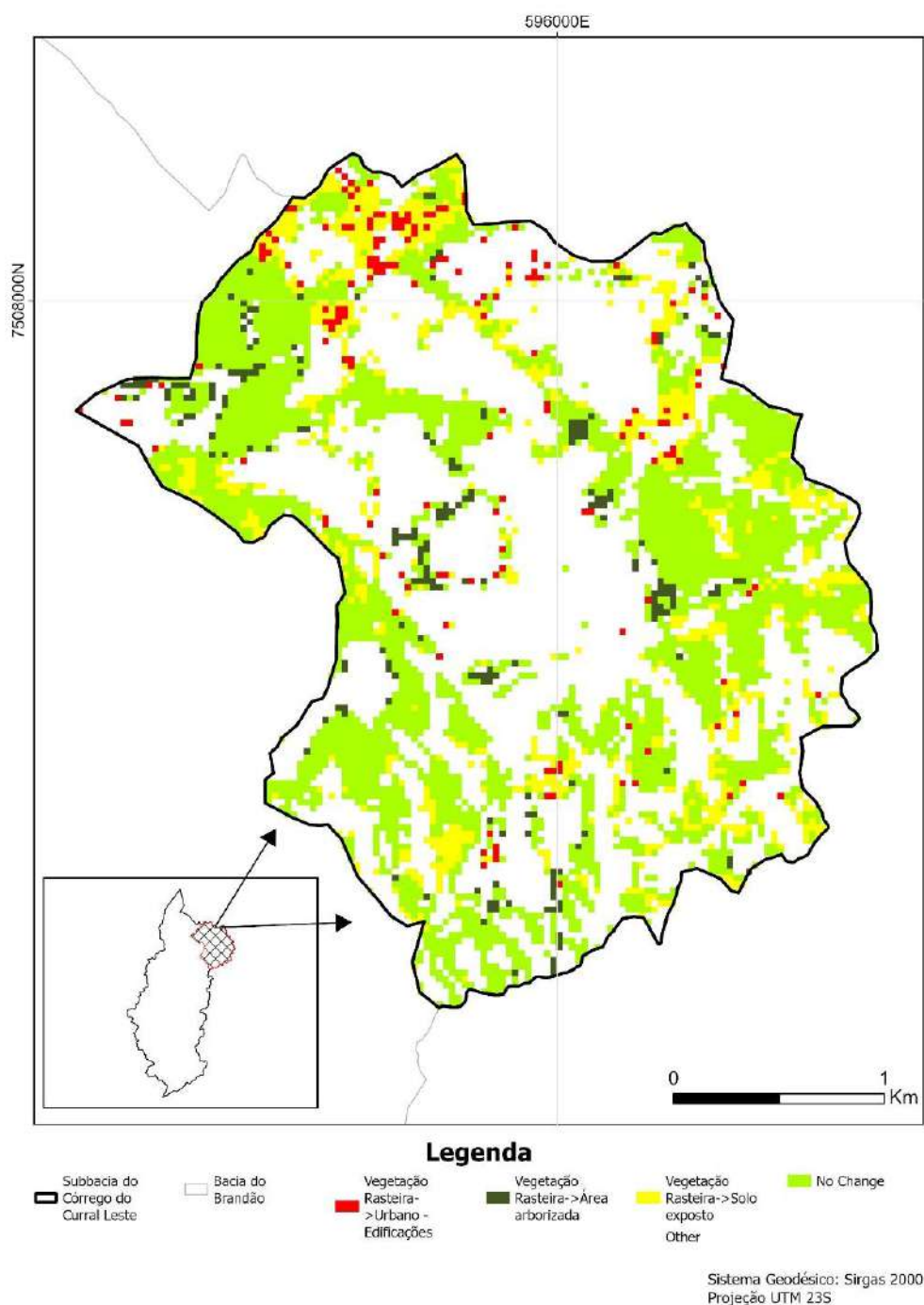


Figura 18 – Transformações da classe vegetação rasteira entre 2014 e 2024 na sub bacia do Curral-Leste, tributário do Ribeirão Brandão.

Transformações da classe vegetação rasteira entre 2014 e 2024



O mapa de transformações da classe solo exposto (Figura 19) é aquele que apresenta a maior densidade de *pixels* em mudança, reforçando o papel dessa classe como indicador de instabilidade e transição. A distribuição de pixels em vermelho, que representam a conversão de solo exposto em urbano-edificações, é particularmente expressiva na porção central da sub-bacia e em setores a montante e jusante do núcleo urbano principal. Esses padrões sugerem que o solo exposto atua como etapa intermediária na abertura de áreas para urbanização, associando-se à implantação de loteamentos, vias e infraestrutura.

Os *pixels* em verde indicam transições de solo exposto para área arborizada, o que aponta situações pontuais de revegetação ou adensamento da cobertura vegetal, possivelmente relacionadas à regeneração de capoeiras, plantio de cultivos arbóreos ou arborização de áreas urbanas. Já os *pixels* em verde claro marcam a conversão de solo exposto em vegetação rasteira, distribuídos de forma relativamente ampla pelas encostas e interflúvios. Esse padrão é coerente com a dinâmica de pastagens e áreas de uso agropecuário, nas quais períodos de solo desnudo (por preparo do terreno, pisoteio intenso ou degradação) podem ser seguidos por reestabelecimento de cobertura herbácea, mas no caso da sub bacia analisada mostra-se relacionado com a retomada da vegetação nas áreas modificadas pela implantação das obras da rodovia do Contorno ou a ciclos mais longos de duração entre a remoção da vegetação por terraplanagens e a implantação das edificações urbanas.

Em contraposição, os *pixels* que permanecem como solo exposto ao longo da década se concentram em faixas e manchas dispersas pela sub-bacia, sugerindo a persistência de áreas com baixa capacidade de regeneração ou de uso intensivo contínuo. Do ponto de vista geomorfológico, a manutenção e a expansão de superfícies desnudas nas encostas e margens de vale tende a aumentar o aporte de sedimentos aos canais de drenagem, favorecendo processos de assoreamento e instabilidade de margens.

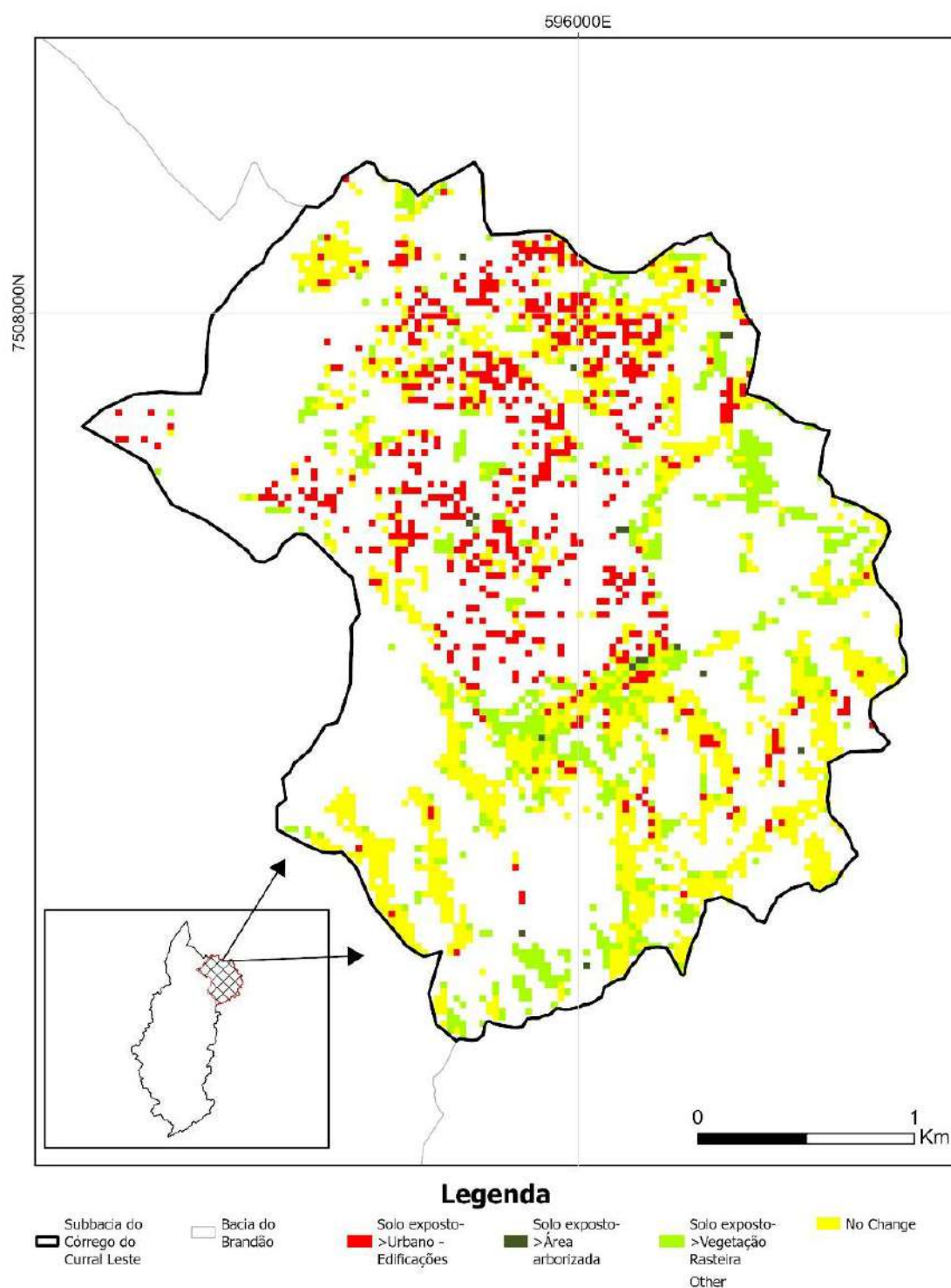
No mapa de transformações da classe urbano-edificações (Figura 20), os pixels em vermelho indicam zonas urbanas que permaneceram edificadas entre 2014 e 2024, definindo um núcleo bastante consolidado na parte central da sub-bacia e um prolongamento em direção ao setor sudoeste. Esse padrão reflete a presença de bairros de ocupação mais antiga e consolidada na sub bacia, ainda que possam ocorrer mudanças internas de uso e densidade não captadas pela classificação.

As transições a partir da classe urbano-edificações são majoritariamente periféricas a esse núcleo. *Pixels* em amarelo representam áreas que passaram de urbano para solo exposto, o que está associado a obras de infraestrutura ou fases de implantação de novos empreendimentos. Por sua vez, *pixels* em verde claro indicam conversão de urbano-edificações para vegetação rasteira, sugerindo desocupação e posterior colonização por cobertura herbácea, seja em lotes abandonados temporariamente, seja em áreas que passaram a ser utilizadas como terrenos baldios, pastos ou áreas verdes urbanas. Os *pixels* em verde escuro, que sinalizam a passagem de urbano para área arborizada, são raros, mas podem representar iniciativas pontuais de arborização urbana ou transformação de áreas edificadas em espaços com maior densidade de árvores.

Esse conjunto de transformações indica que, embora o núcleo urbano se mantenha estável, há uma dinâmica intensa na sua periferia imediata, com ciclos de abertura de áreas, construção, desocupação e revegetação. Tais processos reforçam a importância de considerar não apenas a expansão horizontal da mancha urbana, mas também a rotatividade de usos e coberturas dentro e ao redor do tecido urbano consolidado, que influencia diretamente os padrões de escoamento superficial e a produção de sedimentos na sub bacia.

Figura 19 – Transformações da classe solo exposto entre 2014 e 2024 na sub bacia do Curral-Leste, tributário do Ribeirão Brandão.

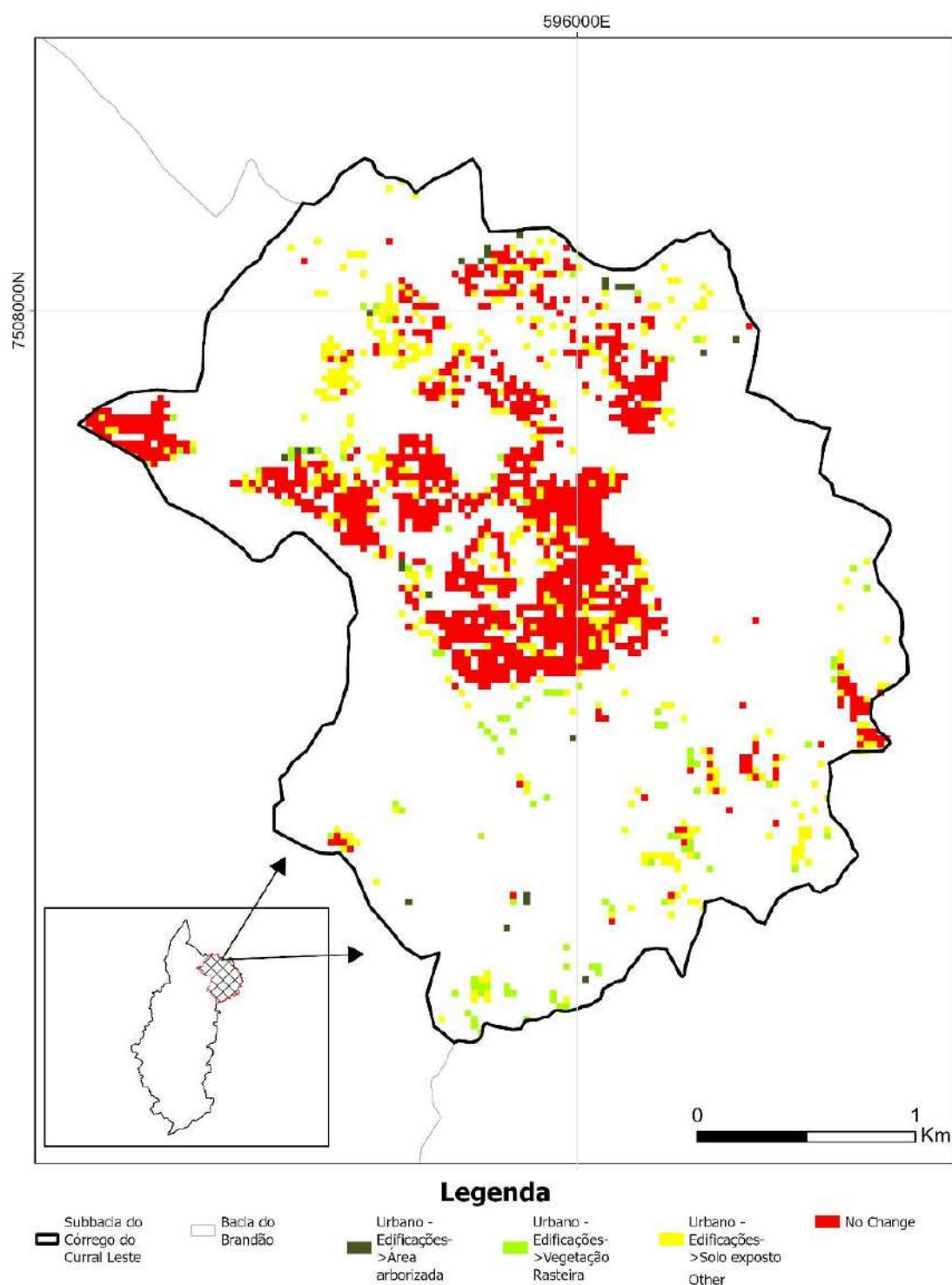
Transformações da classe solo exposto entre 2014 e 2024



Sistema Geodésico: Sirgas 2000
Projeção UTM 23S

Figura 20 – Transformações da classe urbano entre 2014 e 2024 na sub bacia do Curral-Leste, tributário do Ribeirão Brandão.

Transformações da classe urbano entre 2014 e 2024



Sistema Geodésico: Sirgas 2000
Projeção UTM 23S

6.2. Análise do NDVI

A Figura 21 apresenta a média anual do NDVI para os anos de 2014 (à esquerda) e 2024 (à direita) na bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão, evidenciando a distribuição espacial da cobertura vegetal ao longo de uma década.

A escala de cores utilizada nos mapas varia do vermelho (valores mais baixos de NDVI, indicando ausência ou raridade de vegetação) ao verde escuro (valores mais altos, representando vegetação mais densa e contínua). Os valores variaram entre -0,028 a 0,460 em 2014 e -0,020 a 0,471 em 2024, demonstrando que o intervalo espectral máximo se manteve praticamente o mesmo, embora com discretíssimo avanço no limite superior.

A análise comparativa dos mapas de NDVI entre os anos de 2014 e 2024 revela tanto persistências quanto mudanças significativas na cobertura vegetal da bacia do Ribeirão Brandão. Observa-se que, embora o padrão geral da vegetação permaneça relativamente constante em algumas áreas de encosta e zonas periféricas, houve modificações notáveis nos setores mais urbanizados, particularmente na porção leste da bacia e nos trechos de jusante, próximos à foz do Ribeirão.

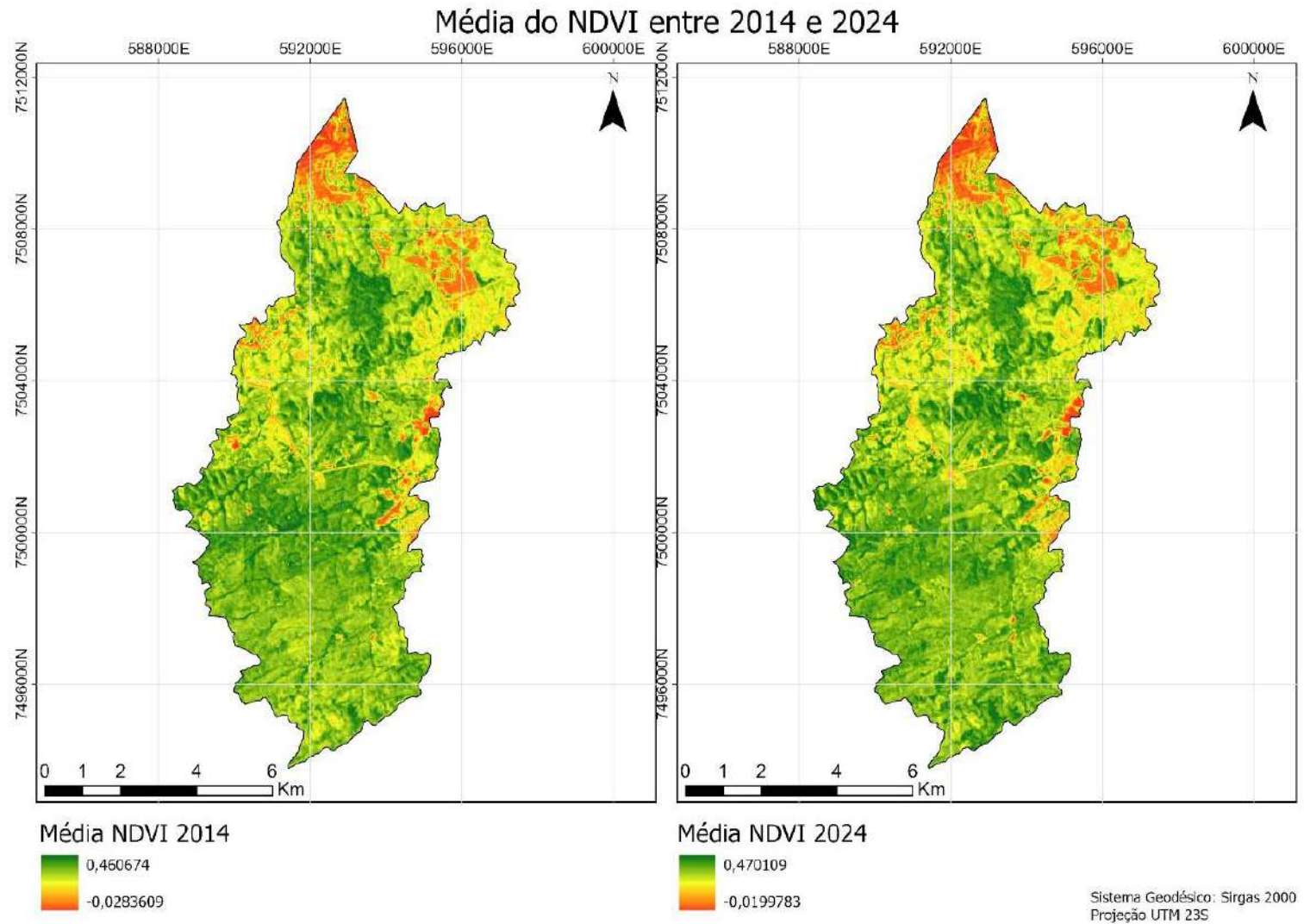
A porção leste da bacia, correspondente à sub-bacia do Córrego do Curral-Leste, apresenta acentuada concentração de baixos valores de NDVI (inferiores a 0,2), indicando predomínio de superfícies impermeáveis e escassa presença de vegetação, compatíveis com adensamento urbano e ausência de cobertura ripária. Essa área, anteriormente já impactada, exhibe entre 2014 e 2024 um avanço de manchas em tons alaranjados e vermelhos — representando valores reduzidos de NDVI — que se tornam mais densas e contínuas, sugerindo intensificação do processo de artificialização da paisagem e perda de cobertura vegetal.

Na região da foz da bacia, que abrange os bairros mais antigos de Volta Redonda, também se mantêm os baixos valores de NDVI. A continuidade dessas manchas vermelhas entre os dois períodos analisados confirma a permanência de um padrão de baixa vegetação nessas áreas centrais, refletindo a persistência da urbanização consolidada e da impermeabilização do solo.

Por outro lado, no alto curso da bacia, especialmente nas áreas mais afastadas dos principais eixos viários e das manchas urbanas centrais, é possível identificar uma leve ampliação das áreas representadas por tons esverdeados, sobretudo entre as faixas de NDVI entre 0,3 e 0,5. Essas áreas apontam para a presença de vegetação moderadamente densa, possivelmente associada a processos de regeneração

natural, cultivos florestais ou manutenção de fragmentos florestais em encostas e fundos de vale. Há também indícios de incremento da cobertura vegetal ao longo de drenagens de menor ordem, o que pode indicar recuperação espontânea da vegetação ripária em alguns trechos não diretamente impactados pela expansão urbana.

Figura 21 - Mapa das médias anuais do NDVI de 2014 e 2024



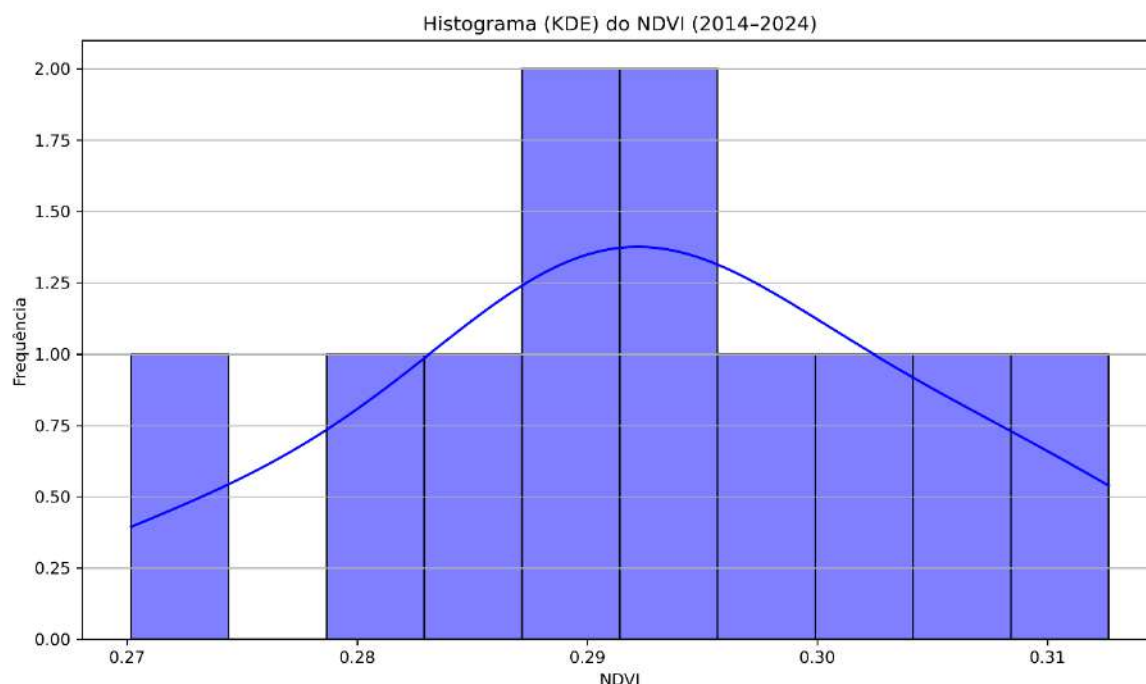
Apesar dessas melhorias localizadas, a maior parte da bacia permanece dentro das faixas intermediárias de NDVI (0,2 a 0,4), o que sugere vegetação descontínua ou rala, compatível com capoeiras, áreas de gramíneas ou arborização esparsa. Valores mais elevados de NDVI (acima de 0,5), compatíveis com vegetação densa e bem estruturada, continuam restritos a zonas de encosta nas porções mais altas da bacia, longe da influência direta da urbanização.

Portanto, a evolução do NDVI no período analisado demonstra um cenário de degradação persistente nas áreas urbanizadas e de ligeira recuperação em setores periféricos da bacia. Essa configuração espacial evidencia o papel central da urbanização no controle da dinâmica da vegetação local, sendo compatível com o padrão de fragmentação da cobertura vegetal associado ao processo de tecnogênese urbana identificado por Almeida et al. (2022) na bacia do Ribeirão Brandão

O Gráfico 1 apresenta um histograma com curva de densidade estimada por kernel (KDE) para os valores do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) obtidos entre os anos de 2014 e 2024 na área de estudo. Valores do NDVI variam de -1 a +1, sendo que valores negativos costumam indicar corpos d'água ou superfícies altamente refletoras e sem vegetação; valores próximos de zero correspondem geralmente a solos expostos ou superfícies impermeáveis, enquanto valores superiores a 0,4 tendem a representar vegetação densa e saudável (NASA, 2013).

Com base em décadas de aplicações em sensoriamento remoto com imagens Landsat (30 metros de resolução), consolidaram-se faixas heurísticas para interpretação do NDVI em áreas urbanas e rurais. Valores menores que 0,00 estão associados à presença de corpos hídricos, sombras densas e superfícies muito escuras (como telhados de amianto ou vegetação morta), devendo ser confirmados com índices auxiliares, como o NDWI. Faixas entre 0,00 e 0,10 são típicas de superfícies artificiais com pouca ou nenhuma vegetação, como asfalto, concreto, telhados e rocha nua. Já valores entre 0,10 e 0,20 representam solos expostos, campos abertos com vegetação degradada ou áreas urbanas com escassa arborização. O intervalo entre 0,20 e 0,40 caracteriza áreas com vegetação rala ou descontínua, frequentemente associada a mosaicos urbanos-vegetados, gramíneas esparsas ou corredores ripários estreitos. Valores entre 0,40 e 0,60 indicam vegetação moderadamente densa, como capoeiras médias, plantações vigorosas ou florestas secundárias em regeneração. Por fim, valores acima de 0,60 são compatíveis com vegetação densa e contínua, incluindo trechos de floresta tropical bem desenvolvida.

Gráfico 1- Histograma KDE do NDVI (2014-2024).



No caso da bacia em análise, observa-se que os valores de NDVI estão concentrados em uma faixa bastante estreita — entre aproximadamente 0,27 e 0,315 — com o pico da distribuição (modo) em torno de 0,295. Essa concentração indica que a vegetação predominante ao longo da bacia se insere nas faixas intermediárias de NDVI, associadas a mosaicos descontínuos de cobertura vegetal. Em outras palavras, a bacia apresenta majoritariamente áreas com vegetação rala, capoeiras em regeneração, gramíneas, fragmentos isolados de mata e arborização esparsa, intercalados com elementos urbanos ou solos desnudos.

Essa configuração é compatível com a realidade já observada nas análises espaciais anteriores. No baixo curso da bacia, por exemplo, a dominância de superfícies urbanas com vegetação esparsa é típica de áreas consolidadas, com fundos de vale fragmentados e arborização limitada a faixas estreitas. Nos médio e alto cursos, por sua vez, o padrão de NDVI observado está associado a zonas mistas, com áreas em regeneração, pastagens e usos diversos como atividades agropecuárias e zonas periurbanas em expansão.

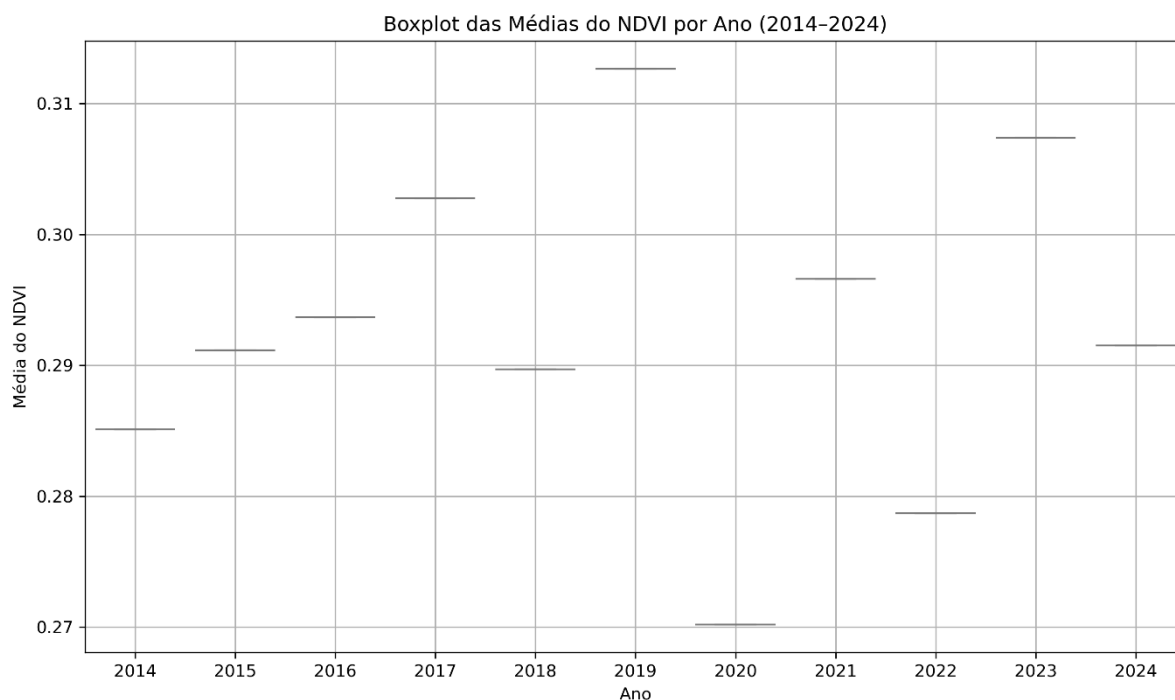
A baixa variabilidade do NDVI ao longo do intervalo analisado, evidenciada pela suavidade e simetria da curva KDE e pela frequência equilibrada nas barras do histograma, sugere uma estabilidade na cobertura vegetal média da bacia durante o período. Tal estabilidade não implica ausência de mudanças locais, mas sim a ausência de transformações estruturais significativas no conjunto da bacia. É

importante frisar que o gráfico não expressa uma evolução temporal direta dos valores, e sim uma síntese da distribuição dos índices ao longo do recorte de dez anos. Assim, seu principal papel é indicar a predominância relativa de determinados tipos de cobertura vegetal com base em seus padrões espectrais médios.

O Gráfico 2 apresenta o boxplot das médias anuais do NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) ao longo de onze anos (2014–2024) para a bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão. Observa-se que, apesar de flutuações pontuais entre os anos, os valores se mantêm dentro de um intervalo relativamente estreito, oscilando entre aproximadamente 0,27 e 0,315.

Essa faixa é compatível com as classificações típicas de vegetação rala, descontínua ou em mosaico com superfícies urbanizadas — como gramíneas esparsas, capoeiras baixas, arborização fragmentada e trechos de vegetação secundária pouco estruturada. O *boxplot* é um recurso gráfico útil para visualizar a distribuição estatística de uma variável ao longo do tempo, destacando sua mediana, dispersão (amplitude interquartil) e valores extremos, permitindo comparações diretas entre os anos. Diferentemente do histograma KDE (), que resume a distribuição geral dos valores, o *boxplot* segmenta os dados por ano, permitindo observar flutuações interanuais, anomalias e potenciais tendências no comportamento da vegetação.

Gráfico 2 - Boxplot das Médias do NDVI (2014 - 2024).



De forma geral, a estabilidade das médias ao longo do tempo reforça a leitura de que a cobertura vegetal da bacia encontra-se em um estado persistentemente intermediário, sem sinais de degradação acentuada, mas tampouco de regeneração significativa. Não há evidências, por exemplo, de transições para faixas de NDVI superiores a 0,4, que indicariam vegetação mais densa ou corredores ripários consolidados. Ainda que existam variações interanuais, estas não alteram o regime espectral dominante da bacia. Conforme explicado anteriormente, valores de NDVI inferiores a 0,20 indicam solo exposto, telhados e áreas impermeáveis; valores entre 0,20 e 0,40 correspondem a vegetação esparsa ou degradada; e valores superiores a 0,60 são típicos de vegetação densa e contínua (NASA, 2013).

Analisando em detalhe os anos com maior expressividade positiva, os anos de 2017, 2019 e 2023 apresentam médias em torno ou ligeiramente acima de 0,31. Essa elevação pontual pode estar associada a fatores climáticos favoráveis — como maior precipitação ou menor estresse hídrico —, a práticas temporárias de manejo (como reflorestamentos localizados), ou a condições específicas de aquisição e qualidade das imagens utilizadas (ex: menor interferência atmosférica ou nebulosidade). Esses picos, no entanto, não caracterizam uma tendência consolidada de recuperação ambiental, mas sim oscilações dentro de um padrão historicamente estabilizado.

Por outro lado, os anos de 2020 e 2022 destacam-se por apresentarem os menores valores médios do período, com NDVI próximos de 0,27. Essa redução pode refletir impactos pontuais como secas severas, intensificação da urbanização em determinadas sub-bacias, ou até limitações na qualidade das imagens orbitais (como presença de nuvens finas ou neblina não detectada), mesmo após os processos de filtragem e pré-processamento.

O fato de nenhum dos anos avaliados ter ultrapassado a marca de $\text{NDVI} > 0,4$ — limiar geralmente associado a vegetação moderadamente densa e estruturada — é particularmente revelador. Ele indica que, ao longo de uma década, a bacia do Ribeirão Brandão não apresentou avanços significativos em termos de recomposição florestal ou melhoria estrutural da vegetação ripária, especialmente nas áreas mais antropizadas.

Em síntese, o boxplot das médias anuais de NDVI evidencia um cenário de estabilidade relativa, porém estagnado. Embora não haja sinais de colapso ecológico iminente, também não se detecta progresso efetivo em direção à recuperação ambiental. A permanência em faixas intermediárias de vegetação ao longo do período

sugere uma condição de equilíbrio frágil, marcada por vegetação descontínua e pressões antrópicas permanentes, típica de bacias urbanas em processo de tecnogênese avançada. Esse diagnóstico reforça a importância de intervenções planejadas para restaurar conectividades ecológicas, em especial nas faixas ripárias e encostas adjacentes aos cursos d'água.

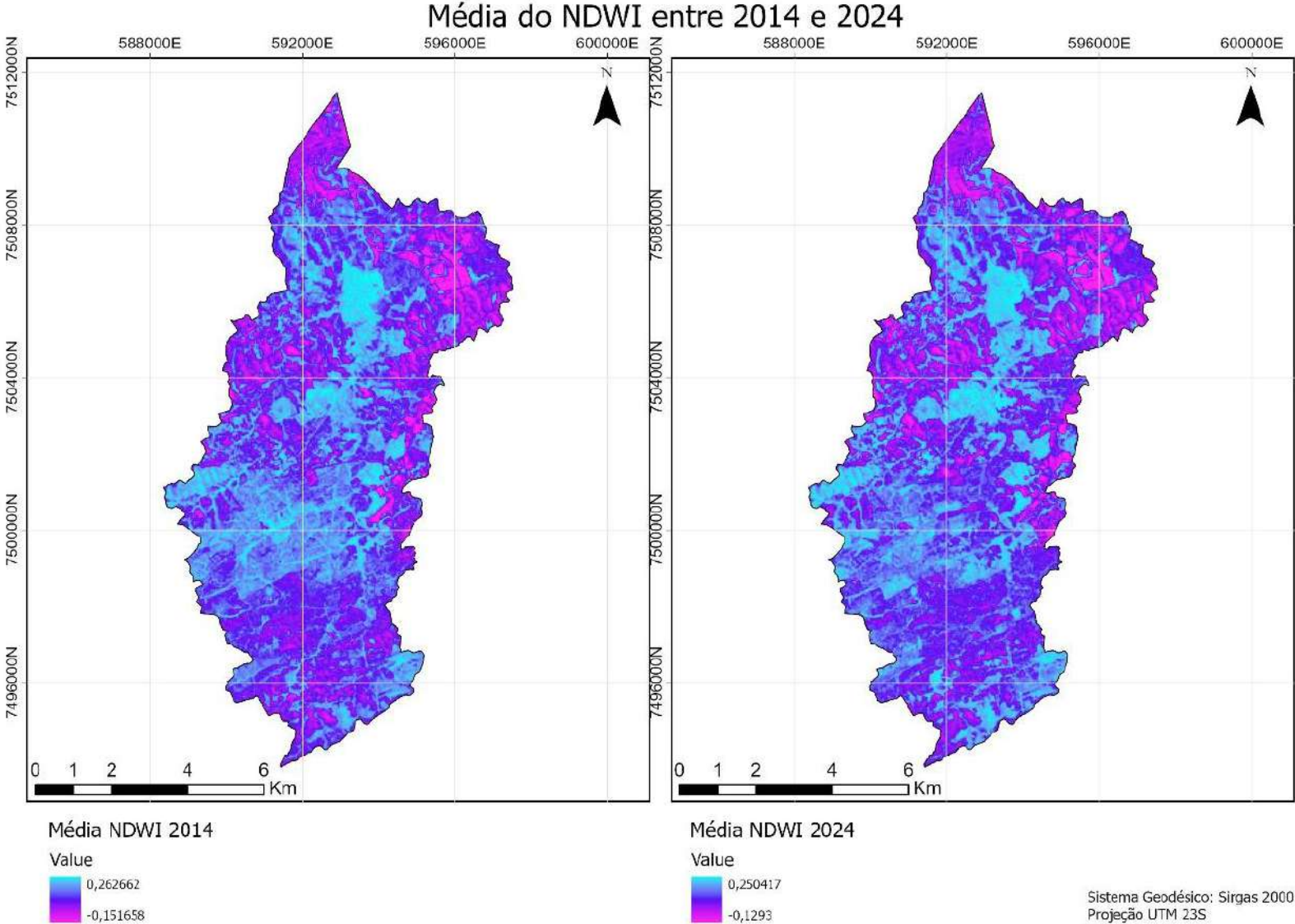
6.3. Análise do NDWI

A Figura 22 apresenta os mapas temáticos da média anual do índice NDWI (*Normalized Difference Water Index*) gerada para os anos de 2014 e 2024. O NDWI foi calculado com base na formulação proposta por Gao (1996), utilizando as bandas espectrais do verde (Green) e do infravermelho próximo (NIR), visando à estimativa do teor de umidade superficial em áreas vegetadas ou com solo exposto. A representação cartográfica adotada expressa os valores contínuos do índice por meio de uma escala cromática que varia de azul-claro (valores mais altos, indicando maior umidade) a tons escuros de azul e rosa magenta (valores negativos, indicativos de solo seco e superfícies impermeabilizadas).

De acordo com os dados processados, observa-se que em 2014 os valores de NDWI variaram entre $-0,1516$ e $+0,2626$, ao passo que em 2024 a variação foi de $-0,1293$ a $+0,2504$. Embora os intervalos permaneçam similares em ambos os anos, nota-se uma leve contração da faixa superior e uma ligeira elevação da faixa inferior, indicando um estreitamento da variabilidade espectral do índice.

As cores predominantes nos mapas — variando de tons de azul claro a roxo intenso — reforçam essa leitura. Os tons azulados, que representam valores levemente positivos, estão associados a áreas com alguma retenção de umidade, especialmente ao longo de trechos ripários ou zonas de encosta com vegetação arbórea. Esses setores são visíveis em ambos os mapas, com destaque para porções do centro-sul e do alto curso da bacia. No entanto, observa-se que, em 2024, essas manchas azuis tornam-se mais esparsas e fragmentadas, indicando possível retração de áreas úmidas.

Figura 22 - Mapa das médias anuais do NDWI de 2014 e 2024.



Por outro lado, as áreas em magenta ou roxo predominam em quase toda a extensão da bacia, sinalizando baixos valores de NDWI (< 0), compatíveis com solos ressecados, cobertura vegetal degradada ou urbanização intensiva. Esse padrão é especialmente marcante na porção norte e leste da bacia, onde o adensamento urbano e a substituição da vegetação nativa por superfícies impermeáveis provocam redução na infiltração de água e aumento do escoamento superficial.

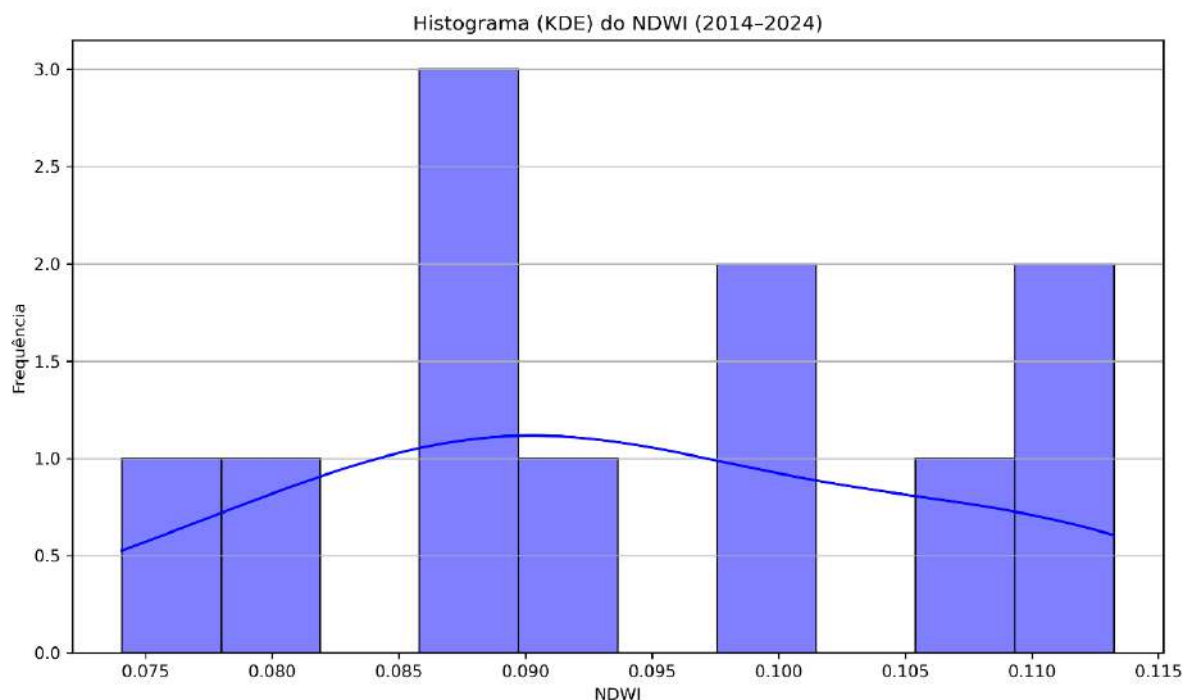
Ao comparar os dois anos, a ligeira redução na média do NDWI — de 0,2626 em 2014 para 0,2504 em 2024 — sugere um declínio sutil, porém contínuo, da umidade superficial média na bacia. Essa tendência pode refletir a intensificação do uso urbano do solo, a compactação do terreno, a perda de vegetação arbórea e/ou a diminuição da recarga hídrica, especialmente em sub-bacias mais antropizadas como a do Córrego do Curral-Leste.

A distribuição espacial dos valores mostra que as zonas com valores mais negativos se concentram no baixo curso da bacia, associando-se ao entorno das malhas urbana e viária de Volta Redonda e Barra Mansa, o que é coerente com a exposição dos solos pelos processos ligados à expansão urbana e com a canalização dos cursos d'água descritos por de Almeida, Mello e Peixoto (2022), isolando os canais de suas planícies de inundação. As áreas com valores menos negativos (próximos de zero) estão localizadas majoritariamente ao longo do eixo do Ribeirão Brandão no médio e baixo curso da bacia, onde se encontra a ARIE da Cicuta, e também nos tributários do médio e alto curso da bacia, onde há reduzida ocupação urbana. menor adensamento urbano. Evidencia-se ainda a existência de significativos trechos com maior NDWI associados aos fundos de vale embrejados. A menor expressão de áreas com NDWI positivo ($> 0,00$) em ambos os anos reforça a baixa permanência ou grande variabilidade de áreas úmidas ao longo dos corpos d'água superficiais, especialmente dos pequenos córregos e canais embrejados, assim como das pequenas represas, sendo o ressecamento dos brejos um aspecto documentado no estudo realizado por (Ribeiro, 2016). Conforme sistematizado por (Gao, 1996), valores positivos de NDWI são geralmente esperados em áreas saturadas ou vegetadas com alta umidade.

O Gráfico 3 apresenta o histograma com densidade estimada por kernel (KDE) dos valores médios anuais do índice NDWI (*Normalized Difference Water Index*), calculados para a bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão entre os anos de 2014 e 2024. O índice foi obtido com base na fórmula proposta por Gao (1996), definida como

NDWI = (Green – NIR) / (Green + NIR), e tem como objetivo detectar variações na umidade superficial de áreas vegetadas e solos expostos.

Gráfico 3 - Histograma KDE do NDWI (2014 - 2024).



O Gráfico 3 apresenta a curva de densidade estimada por kernel (KDE) sobreposta a um histograma da frequência dos valores médios anuais de NDWI (*Normalized Difference Water Index*) entre os anos de 2014 e 2024. Essa representação é particularmente útil para conjuntos de dados com amostras reduzidas, como séries temporais curtas, pois permite suavizar a distribuição e identificar padrões estatísticos centrais com maior clareza.

A distribuição observada é unimodal e levemente assimétrica, com uma concentração predominante entre aproximadamente 0,085 e 0,115, sendo o pico de densidade (modo) situado em torno de 0,09. Isso indica que, ao longo da década analisada, os valores médios de NDWI da bacia oscilaram em uma faixa bastante estreita, revelando baixa variabilidade interanual no comportamento espectral relacionado à umidade superficial.

Em termos interpretativos, valores positivos de NDWI (próximos de 0,1) são geralmente associados à presença de corpos d'água, solos saturados ou vegetação com alta retenção hídrica, como áreas ripárias bem conservadas ou zonas úmidas (Xu, 2006). Contudo, o intervalo observado no gráfico se situa em uma faixa

relativamente baixa para áreas naturais úmidas — e mais compatível com superfícies urbanas com alguma vegetação esparsa ou com solos moderadamente secos.

Essa leitura se alinha aos padrões espaciais já identificados na comparação cartográfica do NDWI (ver Gráfico anterior), os quais indicaram predominância de valores negativos ou próximos de zero em toda a bacia. A suavidade da KDE e a concentração em uma faixa restrita também corroboram o diagnóstico de estabilidade espectral, ou seja, de ausência de grandes alterações nos padrões de umidade superficial durante o intervalo de 10 anos.

Apesar de não evidenciar episódios de ressecamento extremo nem de recuperação expressiva, a distribuição revelada pelo histograma KDE aponta para uma condição cronicamente intermediária ou degradada: a bacia do Ribeirão Brandão apresenta baixos índices de umidade superficial mesmo nas áreas vegetadas, o que pode refletir solos compactados, fragmentação da vegetação, perda de cobertura arbórea densa e, sobretudo, ausência de corredores ripários funcionais.

Esse cenário é coerente com os processos de canalização e retificação dos canais fluviais relatados por de Almeida, Mello e Peixoto (2022), que apontam para a perda da conectividade lateral, a substituição das margens naturais por estruturas de contenção rígidas e o colapso das zonas de amortecimento hidrológico. Tais alterações comprometem a capacidade da paisagem de reter, infiltrar e redistribuir água, resultando em uma superficialidade ecológica das zonas úmidas urbanas.

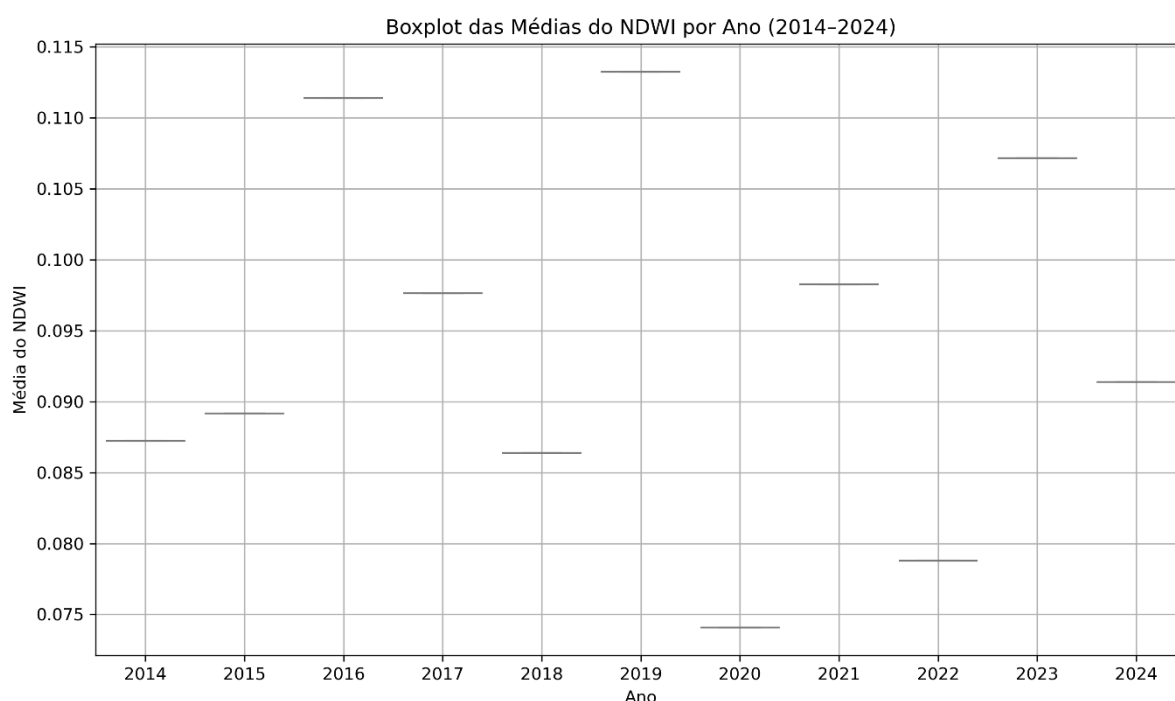
Por fim, a estabilidade estatística do índice ao longo do período analisado — sem grandes dispersões ou picos extremos — pode ser interpretada como sintoma de estagnação das condições ambientais. Em outras palavras, o sistema apresenta uma estabilidade empobrecida, marcada pela persistência de usos do solo que não favorecem a recomposição dos processos hidrológicos naturais nem a restauração ecológica das margens fluviais.

O Gráfico 4 exibe a evolução anual das médias do índice, com o objetivo de detectar variações no teor de umidade superficial em áreas vegetadas e solos expostos. O gráfico apresenta, para cada ano da série histórica entre 2014 e 2024, a distribuição estatística das médias espaciais obtidas, com foco nos valores centrais e eventuais oscilações interanuais.

De modo geral, o NDWI se mostra estatisticamente estável, oscilando de forma moderada entre cerca de 0,074 e 0,113 durante toda a série temporal. Essa estabilidade indica uma baixa variabilidade interanual da umidade superficial na bacia,

embora em níveis considerados baixos para ambientes com vegetação saudável ou presença significativa de água superficial. Estes valores se enquadram, conforme a literatura especializada (Gao, 1996), na faixa associada a condições de baixa umidade superficial, vegetação esparsa e alta presença de superfícies secas ou impermeabilizadas, típicas de ambientes urbanos densamente ocupados.

Gráfico 4 - *Boxplot* das Médias do NDWI (2014 - 2024).



Do ponto de vista interpretativo, o intervalo registrado se encontra abaixo da faixa convencionalmente associada à vegetação altamente hidratada ou a áreas úmidas (geralmente acima de 0,2). Os valores observados — concentrados entre 0,08 e 0,11 — tendem a refletir solos com umidade superficial residual, vegetação esparsa ou com estresse hídrico, e áreas urbanas que mantêm arborização descontínua e baixa infiltração. Isso confirma a condição hidrológica limitada da bacia, já destacada nas análises cartográficas e de histograma.

Analisando os extremos da série, observam-se três aspectos relevantes:

1. Pico de umidade superficial (2019): O ano de 2019 apresenta o maior valor médio da série ($\sim 0,113$), indicando uma condição relativa de maior retenção de umidade no solo ou nas superfícies vegetadas. Esse pico pode estar associado a uma combinação de fatores climáticos, como maior pluviosidade

naquele ano, e também ao ciclo fenológico das formações vegetais temporárias ou cultivadas.

2. Período crítico (2020): O menor valor médio de NDWI foi registrado em 2020 ($-0,074$), evidenciando um ponto de mínima umidade superficial na década. Esse declínio pode estar relacionado a fatores como déficit hídrico, aumento da impermeabilização urbana ou perdas de cobertura vegetal ripária observadas no mapeamento multitemporal da bacia.
3. Oscilação sem tendência linear clara: A alternância de anos com valores ligeiramente mais altos e mais baixos — como 2016, 2019 e 2023, que apresentam médias mais elevadas, contrastando com 2018, 2020 e 2022, que apresentam médias mais baixas — indica a ausência de uma tendência clara de recuperação ou degradação contínua. Esse comportamento sugere um cenário de estagnação ambiental, em que as condições de umidade superficial permanecem cronicamente baixas e flutuam em torno de um patamar crítico.

É importante destacar que mesmo nos anos de melhor desempenho o NDWI não ultrapassa o limiar mínimo normalmente associado a vegetação vigorosa ou solos saturados ($-0,2$), o que reforça o diagnóstico de uma paisagem altamente impactada. Essa condição pode ser explicada, conforme apontado por Almeida, Mello e Peixoto (2022), pela degradação dos corredores fluviais e substituição de áreas ripárias naturais por estruturas urbanas tecnogênicas, resultando na perda da conectividade lateral entre os canais e suas planícies de inundação — um dos pilares para a regulação hídrica de sistemas fluviais saudáveis.

6.4. Análise do NDBI

A Figura 23 apresenta os mapas temáticos comparativos das médias anuais do índice NDBI (*Normalized Difference Built-up Index*) gerados para os anos de 2014 e 2024, na bacia do Ribeirão Brandão, município de Volta Redonda (RJ). Como já apresentado, o NDBI é um índice espectral amplamente utilizado para detectar áreas urbanizadas, estimando a densidade de superfícies construídas e a presença de materiais artificiais como concreto, asfalto e telhados, a partir da razão entre as bandas do infravermelho de ondas curtas (SWIR) e do infravermelho próximo (NIR) (Zha; Gao; Ni, 2003).

Em termos espectrais, valores positivos de NDBI são geralmente associados a áreas densamente edificadas, como núcleos urbanos consolidados, enquanto valores próximos de zero indicam zonas de transição entre edificações urbanas e outras coberturas, e valores negativos correspondem a áreas vegetadas, solos expostos e áreas com baixa densidade construtiva.

A análise espacial do NDBI (*Normalized Difference Built-up Index*) revela que, ao longo do período entre 2014 e 2024, os valores mantiveram-se relativamente estáveis, com variações numéricas discretas: de $-0,2627$ a $0,1517$ em 2014, e de $-0,2504$ a $0,1293$ em 2024. Essa estabilidade estatística sugere que os padrões gerais de uso e ocupação do solo na bacia do Ribeirão Brandão não sofreram transformações drásticas ao longo da década — o que é coerente com a morfologia urbana consolidada da área de estudo. No entanto, alterações pontuais e espacialmente concentradas são claramente perceptíveis.

As áreas com valores positivos de NDBI (representadas em tons de vermelho) indicam forte presença de superfícies artificiais, como edificações, telhados, ruas pavimentadas e outros elementos urbanos impermeáveis. Essas manchas concentram-se predominantemente na porção norte da bacia, em especial:

- Nos bairros centrais de Volta Redonda, situados próximos ao exutório da bacia;
- Na sub-bacia do Córrego do Curral-Leste, marcada por expansão recente e padrão de adensamento linear;
- E no baixo curso da sub-bacia do Córrego da Cachoeirinha, região que apresenta crescimento de ocupações residenciais e alterações na drenagem superficial.

A persistência e, em alguns casos, expansão dessas manchas vermelhas de alto NDBI entre 2014 e 2024 apontam para um processo de adensamento urbano localizado. Embora as diferenças de valor absoluto entre os anos sejam pequenas, a comparação visual revela maior coalescência entre os núcleos edificados, o que pode indicar substituição de áreas vegetadas por novas construções, ampliação de áreas pavimentadas ou consolidação de loteamentos pré-existentes.

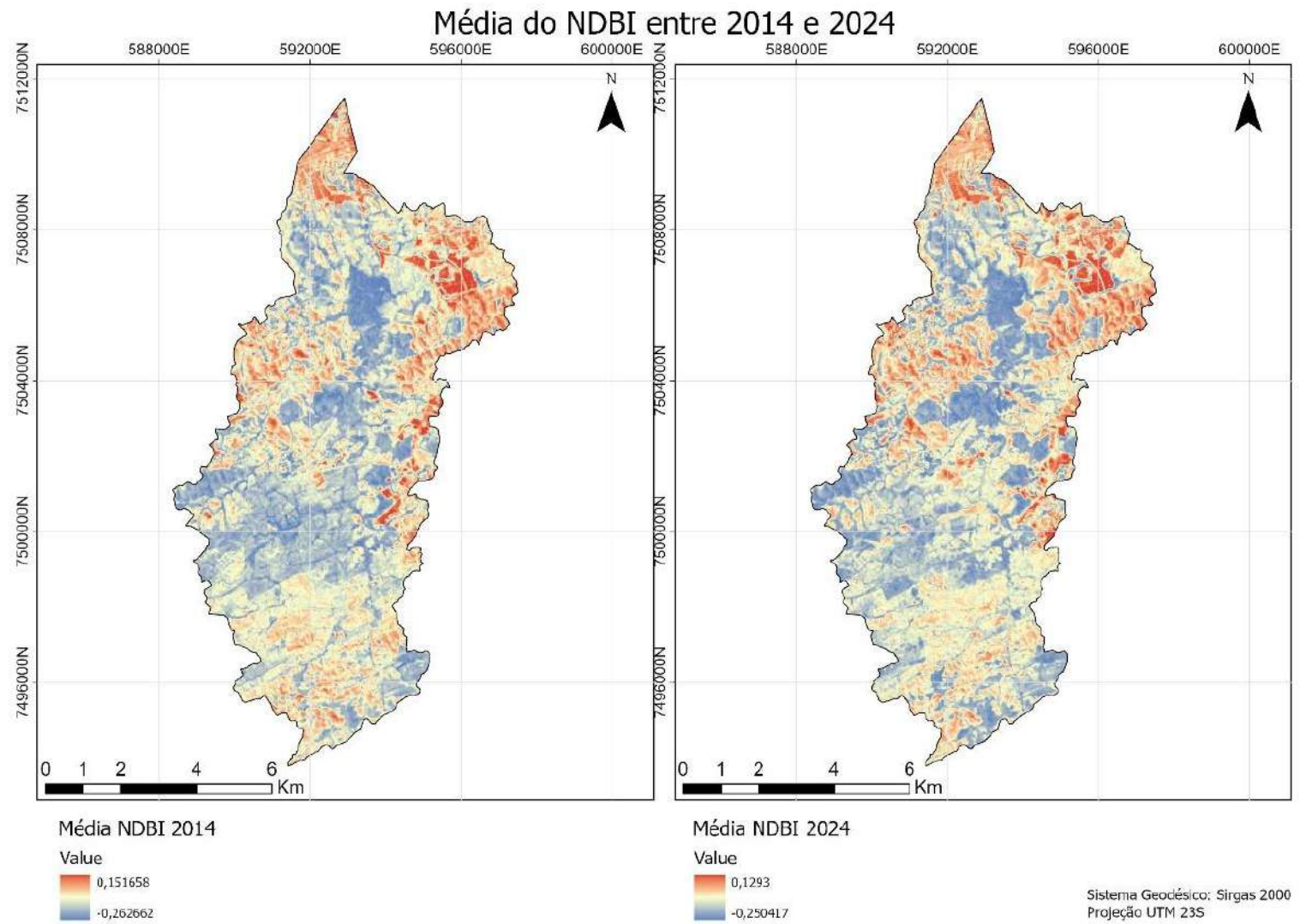
Nas porções média e alta da bacia, predominam valores negativos de NDBI (tons azulados e claros), compatíveis com:

- Vegetação arbórea esparsa ou capoeiras;
- Pastagens com solo exposto intermitente;

- E ocupações urbanas dispersas em áreas de encosta.

Essas zonas de transição, embora menos urbanizadas, permanecem sob risco potencial de expansão, o que exige atenção no planejamento urbano-ambiental — especialmente em virtude da fragilidade geomorfológica e da conectividade hidrológica com os canais fluviais de menor ordem.

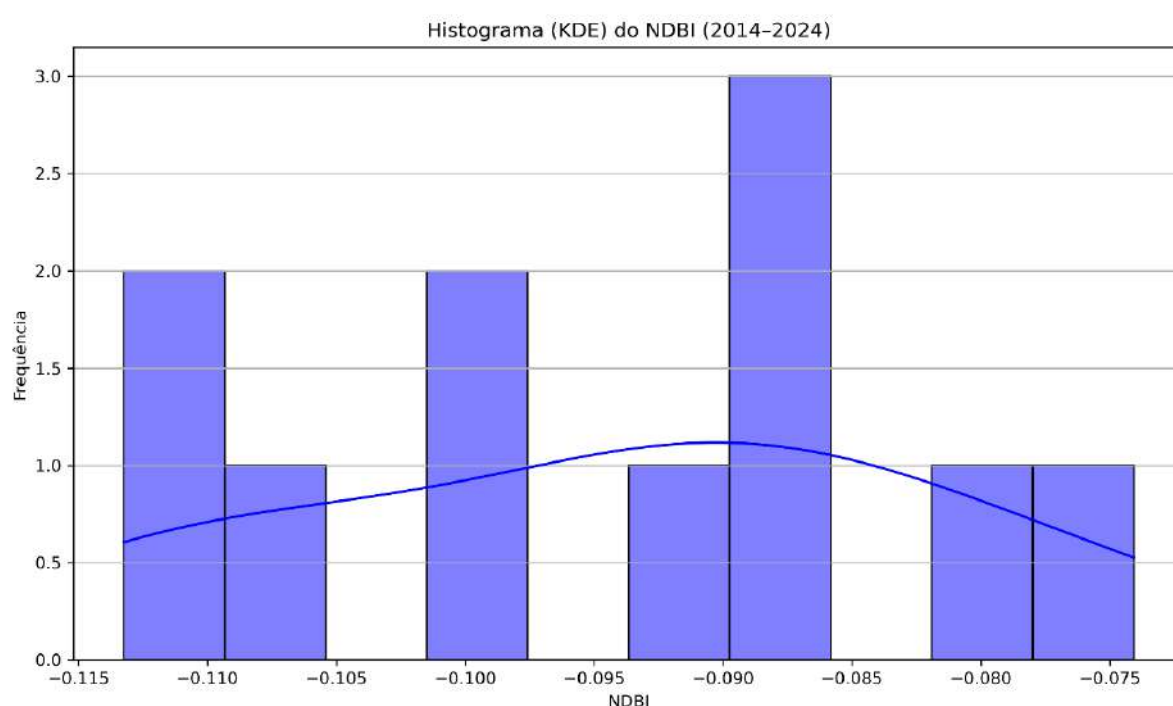
Figura 23 - Mapa das médias anuais do NDBI de 2014 e 2024



A expansão horizontal e o adensamento em trechos já urbanizados, conforme apontado também por Almeida, Mello e Peixoto (2022), reforça a necessidade de políticas públicas voltadas para a contenção da impermeabilização excessiva, recomposição da vegetação ripária e controle do escoamento superficial.

O Gráfico 5 apresenta o histograma com curva de densidade estimada por kernel (KDE) referente aos valores médios anuais do índice NDBI calculados entre 2014 e 2024 para a bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão.

Gráfico 5 - Histograma KDE do NDBI (2014-2024).



Os valores do NDBI, no gráfico, variam entre $-0,115$ e $-0,075$, com modo estatístico em torno de $-0,090$, o que sugere forte predominância de valores levemente negativos. De acordo com a literatura (Zhang et al., 2003), tal faixa é compatível com paisagens urbanas intermediárias, caracterizadas por ocupação antrópica intercalada com cobertura vegetal rala, solos expostos ou áreas gramadas. O índice tende a se manter negativo quando a reflectância no infravermelho próximo (NIR) se sobressai ao SWIR — o que pode ocorrer mesmo em áreas parcialmente urbanizadas com arborização esparsa ou telhados de materiais com baixa reflectância SWIR, como telhas de barro ou superfícies sombreadas.

Em síntese, os dados revelam que a bacia do Ribeirão Brandão, como um todo, não apresenta dominância de áreas densamente urbanizadas (as quais estariam

associadas a valores positivos de NDBI), mas sim uma estrutura urbana difusa, descontínua, marcada por fragmentação da cobertura e pela coexistência de elementos naturais e antrópicos. Isso é especialmente verdadeiro nos setores de transição entre áreas centrais e as porções mais periféricas da bacia.

A baixa variabilidade observada na distribuição (pequena amplitude entre mínimo e máximo) reforça a hipótese de estabilidade no padrão de ocupação do solo ao longo da década analisada. A ausência de caudas largas ou múltiplos picos na curva KDE indica que não houve eventos de urbanização abrupta, ao menos na média da bacia — o que é consistente com a leitura visual da imagem espacial do NDBI.

O Gráfico 6 apresenta a evolução das médias anuais do NDBI (*Normalized Difference Built-up Index*) ao longo da série temporal de 2014 a 2024 para a bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão. Esse índice, ao se basear na razão entre as bandas SWIR e NIR, permite detectar superfícies urbanizadas ou áreas densamente construídas, sendo amplamente utilizado para estimar o grau de impermeabilização e ocupação antrópica do solo.

Ao longo dos dez anos analisados, observa-se que todos os valores médios permaneceram negativos, com variação entre $-0,116$ (valores mínimos em 2016 e 2019) e $-0,076$ (valor máximo em 2020). Esse comportamento indica a ausência de urbanização densa e contínua na maior parte da bacia, ao mesmo tempo em que reflete a presença de uma matriz territorial composta por mosaicos de vegetação rala, solos descobertos e ocupação urbana dispersa — característica comum em áreas urbanas periféricas, corredores viários secundários ou zonas de transição urbano-rural.

A faixa predominante entre $-0,115$ e $-0,085$ é coerente com os resultados do histograma e da análise espacial previamente discutidos, reforçando a leitura de que o NDBI capta um padrão urbano intermediário, conforme indicado por Zhang et al. (20-3). Esse padrão reflete uma realidade em que a urbanização se dá de forma fragmentada, sem consolidar núcleos densos contínuos, o que é condizente com os setores medianos e superiores da bacia, além de áreas de expansão urbana recente.

Destacam-se, no gráfico, oscilações interanuais significativas, como os declínios em 2016, 2017, 2019 e 2023, que aproximam o índice do limite inferior da série. Essas quedas podem estar relacionadas a diferentes fatores, como:

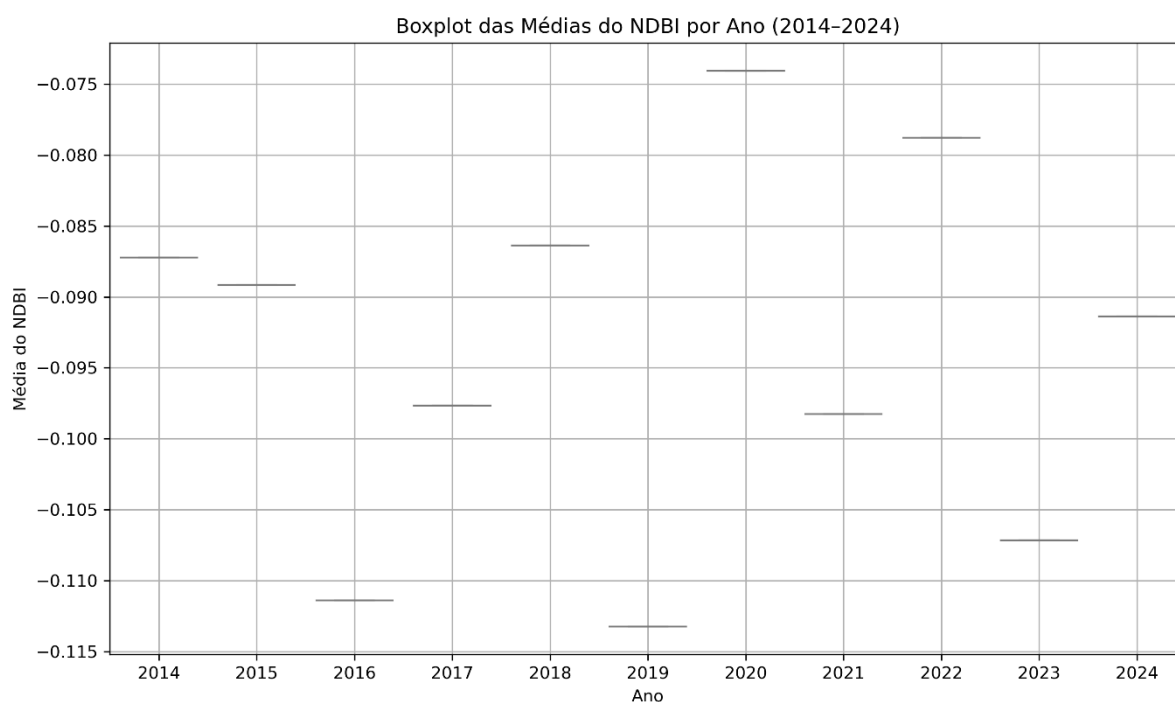
- Cobertura vegetal transitória (ex: sazonalidade de gramíneas ou pastagens);

- Interferência atmosférica ou presença de sombras em algumas cenas Landsat;
- Períodos de menor atividade construtiva ou estabilização urbana.

Em contrapartida, os picos de 2020 e 2022, quando o NDBI atinge valores médios mais elevados (em torno de $-0,08$), sugerem incrementos localizados na ocupação antrópica, que podem estar ligados ao adensamento urbano, à substituição de áreas verdes por infraestrutura ou mesmo à remoção de cobertura vegetal esparsa em áreas de loteamento ou obras.

Por fim, é importante notar que, apesar da predominância de valores negativos, há uma aproximação gradual ao limiar $0,00$, especialmente em anos como 2020 e 2022. Isso implica que porções crescentes da bacia estão sob forte influência urbana, mesmo que não sejam completamente edificadas. Trata-se de um indício de expansão territorial e potencial pressão sobre áreas ecologicamente sensíveis, especialmente margens de drenagens e zonas de recarga hídrica.

Gráfico 6 - *Boxplot* das Médias do NDBI (2014 - 2024).

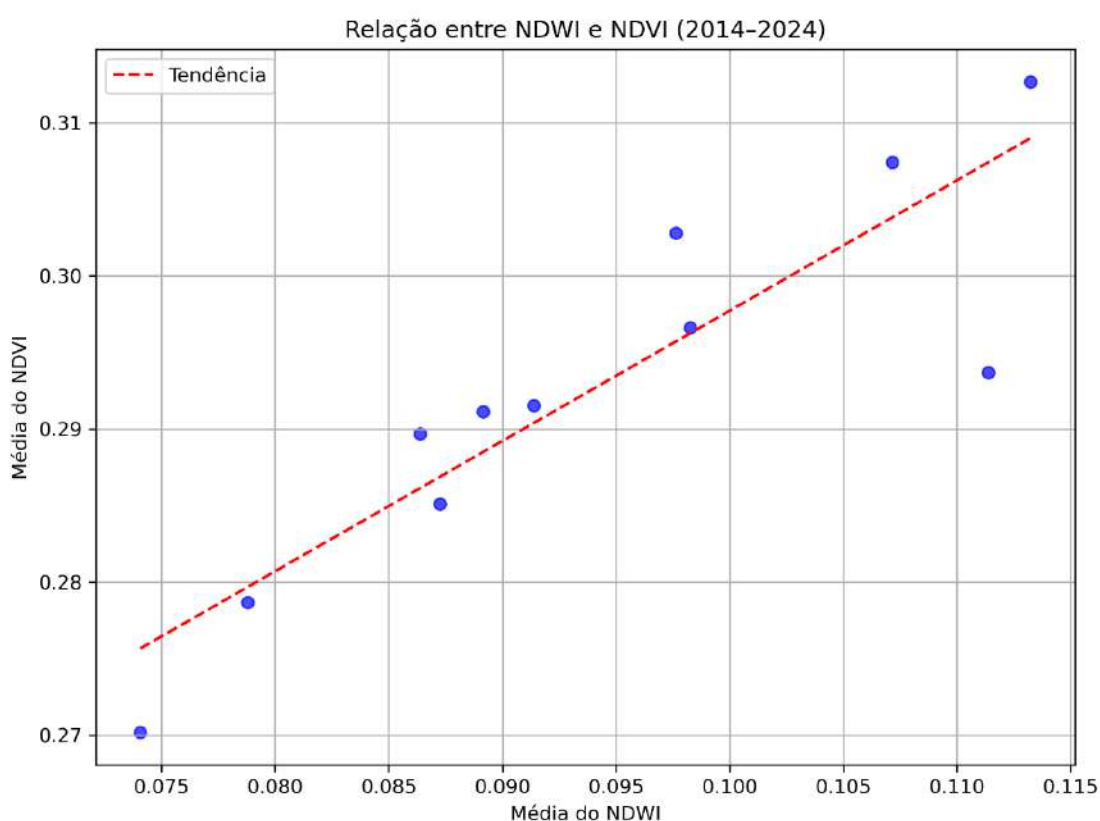


Assim, o boxplot confirma a relativa estabilidade estatística do NDBI, mas alerta para incrementos sutis na ocupação urbana e para a intensificação do mosaico urbano-vegetado, evidenciando a importância do planejamento territorial integrado para conter a fragmentação ecológica e preservar corredores ripários.

6.5. Relações entre os índices

O Gráfico 7 ilustra a correlação entre os valores médios anuais dos índices NDWI (*Normalized Difference Water Index*) e NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) na bacia do Ribeirão Brandão entre os anos de 2014 e 2024. Os pontos azuis representam os pares de médias anuais dos dois índices, enquanto a linha vermelha tracejada mostra o ajuste de uma regressão linear simples, que permite avaliar a direção e a intensidade da associação estatística entre eles.

Gráfico 7 - Relação entre NDWI e NDVI (2014-2024)



A análise da regressão revela uma tendência positiva moderada entre os dois índices: os anos com maiores médias de NDWI também apresentaram, em geral, maiores médias de NDVI.

Esse comportamento sugere uma correlação direta entre a umidade superficial e a presença de cobertura vegetal, o que é esperado do ponto de vista biofísico, especialmente em contextos em que a vegetação rala e descontínua depende diretamente da disponibilidade hídrica superficial para se manter ativa e saudável.

Do ponto de vista espectral, ambos os índices se baseiam na reflectância do infravermelho próximo (NIR):

- O NDVI aumenta em ambientes vegetados, pois a vegetação absorve o vermelho (RED) e reflete fortemente o NIR;
- O NDWI (Gao, 1996), calculado como $(NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$, tende a diminuir em áreas secas ou com vegetação estressada, pois o SWIR reflete mais em superfícies secas ou densamente construídas.

A positividade da correlação sugere que, nos anos em que a vegetação se apresentou mais vigorosa (NDVI alto), também houve maior retenção hídrica superficial (NDWI alto). Esse resultado contraria parcialmente a expectativa de uma correlação negativa entre os índices, o que seria comum em áreas densamente florestadas, mas reflete bem a realidade da bacia, onde predomina:

- Vegetação rala ou gramíneas, que dependem diretamente da umidade superficial;
- Padrões descontínuos de arborização, comuns em zonas urbanas e pastagens degradadas;
- Baixa presença de corpos d'água permanentes, o que faz com que o NDWI esteja mais sensível à umidade do solo do que à água superficial.

Essa associação positiva entre NDVI e NDWI reforça o diagnóstico de que as dinâmicas ecológicas e hidrológicas na bacia são interdependentes e frágeis, com pouca resiliência às variações climáticas e alta sensibilidade à ocupação do solo.

Além disso, a dispersão dos pontos em torno da reta ajustada evidencia que a relação não é perfeitamente linear, indicando a influência de fatores externos e efeitos de escala (como cobertura de nuvens, resolução espacial do sensor ou características microclimáticas).

O Gráfico 8 apresenta a dispersão dos pares de valores médios anuais de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e NDBI (*Normalized Difference Built-up Index*) para o período de 2014 a 2024, com base na bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão. A linha vermelha pontilhada representa o ajuste por regressão linear, que permite identificar a tendência estatística dominante entre os dois índices espectrais.

A regressão resultante apresenta declive negativo acentuado, evidenciando uma correlação inversa forte entre os índices: quanto maior o valor de NDVI, mais negativo tende a ser o valor de NDBI.

Essa correlação negativa é coerente do ponto de vista espectral e ecológico. O NDVI responde positivamente à cobertura vegetal saudável, enquanto o NDBI cresce

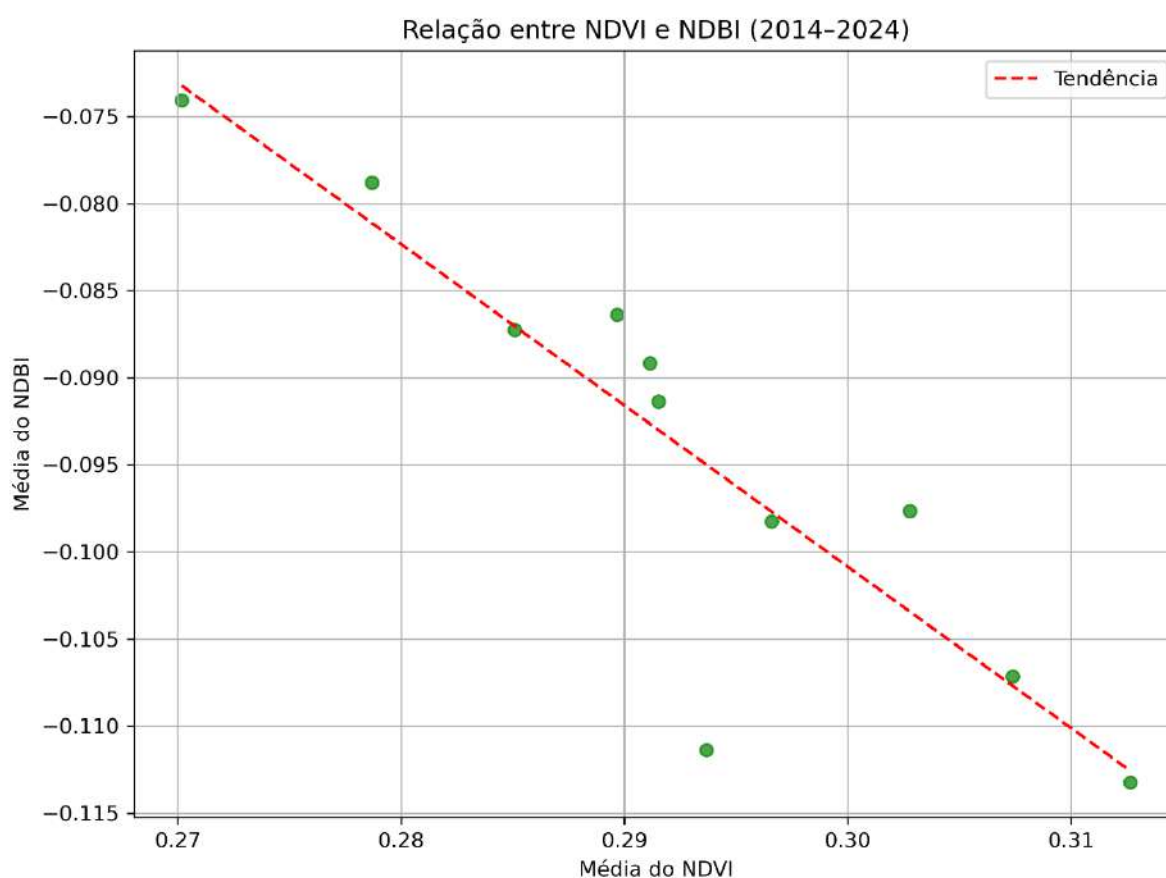
com o aumento da presença de superfícies artificializadas, como concreto, telhados e asfalto. Assim:

- NDVI elevado → vegetação vigorosa → NDBI negativo;
- NDVI reduzido → redução da vegetação e aumento da urbanização → NDBI mais próximo de zero ou levemente negativo.

A distribuição dos pontos no Gráfico 8 indica que:

- Nos anos com NDVI acima de 0,30, os valores médios de NDBI caíram para abaixo de $-0,11$, o que indica maior proporção de cobertura vegetal ou, ao menos, menor predominância de superfícies urbanas contínuas;
- Já nos anos com NDVI próximo de 0,27–0,28, os valores de NDBI se aproximaram de $-0,075$, o que sugere maior influência urbana ou de áreas com solo exposto na composição espectral média da bacia.

Gráfico 8 - Relação entre NDVI e NDBI (2014-2024).



Esses padrões sustentam a ideia de que os anos de maior “verdor” relativo coincidem com menores níveis de artificialização. A consistência dessa relação ao longo da década corrobora a hipótese de que a vegetação residual na bacia é

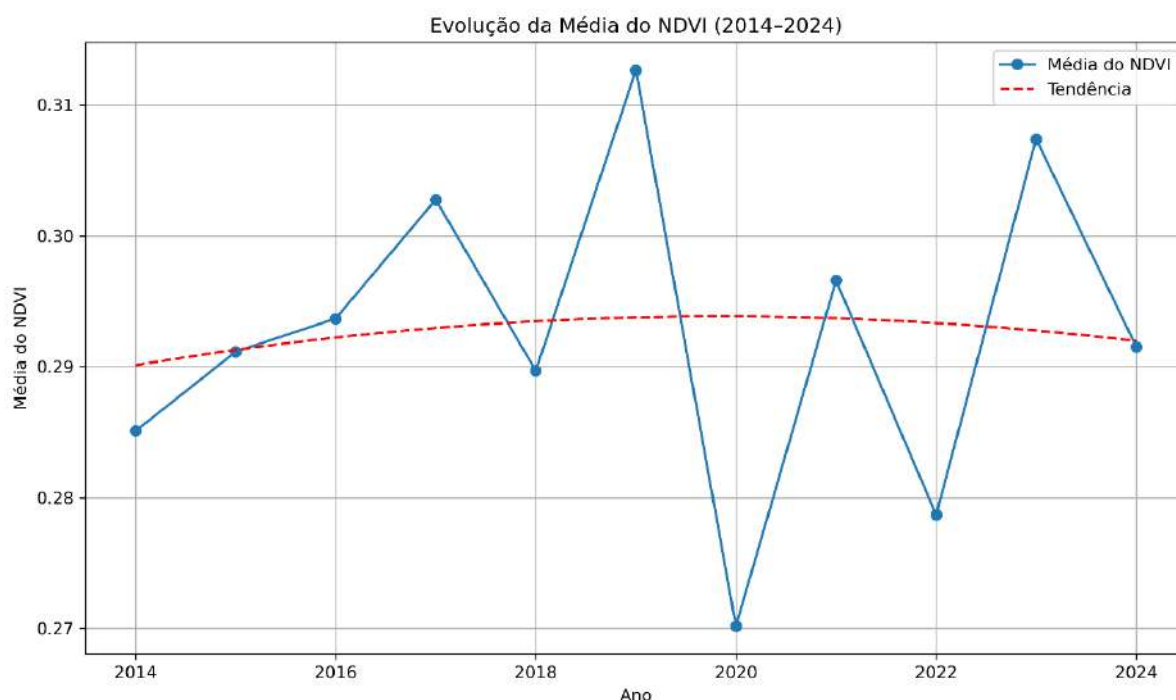
progressivamente reduzida em função da expansão urbana ou da manutenção de padrões de uso do solo pouco permeáveis.

Do ponto de vista aplicado, essa relação inversa entre NDVI e NDBI reforça a eficácia do uso combinado desses dois índices para o diagnóstico ambiental de áreas urbanas e periurbanas, permitindo identificar zonas de pressão antrópica e de possível conflito entre cobertura verde e crescimento urbano.

6.6. Comportamento das médias anuais

A curva de tendência (Gráfico 9) apresenta uma ligeira elevação até aproximadamente 2019, seguida por uma inflexão decrescente até 2024. Este comportamento sugere uma estabilidade relativa no verdor médio da bacia, com flutuações interanuais, mas sem uma tendência marcante de degradação ou recuperação da vegetação no período analisado.

Gráfico 9 - Evolução das Médias Anuais de NDVI (2014-2024).



Deve-se destacar que:

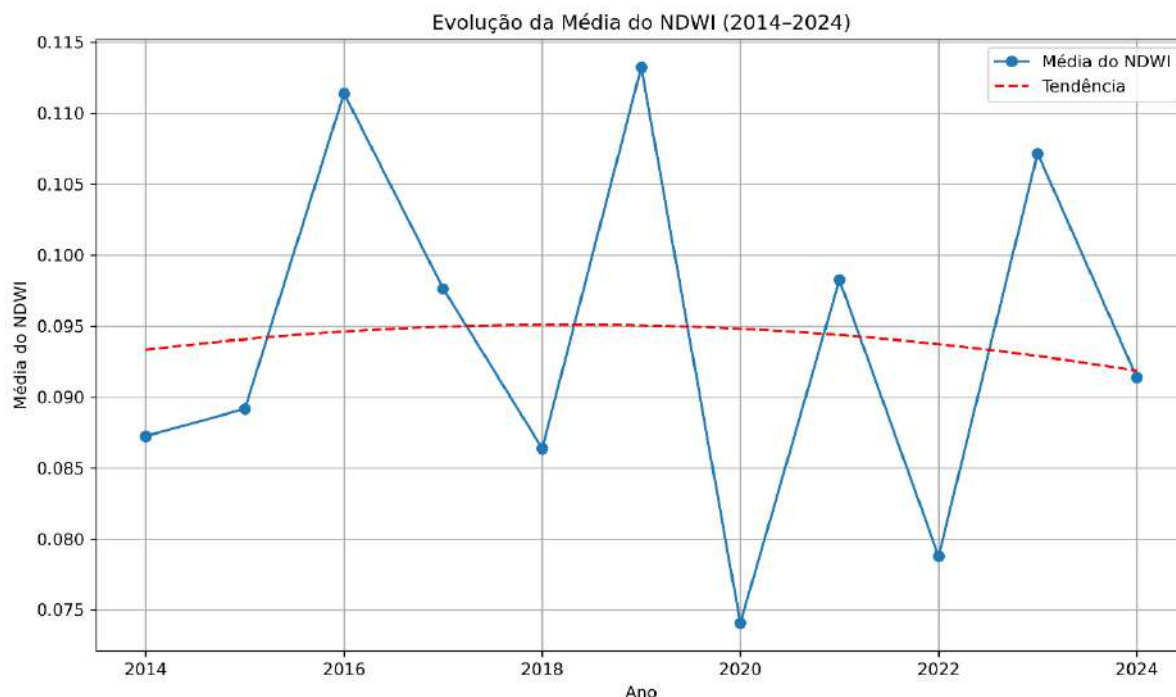
- De 2014 a 2017: houve crescimento contínuo do NDVI médio, possivelmente associado a maior umidade, recuperação pontual de vegetação ou melhorias locais na cobertura.

- Em 2018: houve leve declínio em relação ao pico anterior, ainda dentro da faixa considerada vegetação rala a moderada (NDVI entre 0,28 e 0,31);
- Em 2020: houve queda acentuada para o menor valor da série (aprox. 0,275), que pode indicar fatores climáticos (como seca), maior interferência urbana ou erro espectral relacionado a mascaramento incompleto de sombras;
- Em 2023: houve recuperação expressiva para patamar semelhante ao de 2019, sinalizando potencial resiliência vegetacional em parte da bacia;
- Em 2024: houve recuo discreto da média, mantendo-se ainda dentro dos intervalos típicos de vegetação descontínua ou mosaicos urbano-vegetados.

A análise das médias anuais reforça o diagnóstico de que a bacia apresenta, de forma recorrente, NDVI médio entre 0,28 e 0,31, faixa que, segundo heurísticas consolidadas (Jensen, 2007), é compatível com cobertura vegetal esparsa, gramíneas, capoeiras, áreas de transição ou remanescentes de mata ciliar fragmentada — cenários característicos de ambientes periurbanos e sob influência urbana. A oscilação pontual de anos como 2020 e 2022 pode estar associada a eventos climáticos extremos (como secas sazonais ou queimadas), mudanças temporárias de uso e cobertura do solo, ou ainda limitações metodológicas, como diferenças nos sensores orbitais, ângulo solar, máscara de nuvem ou resolução espectral.

O Gráfico 10 mostra a evolução das médias anuais do NDWI (*Normalized Difference Water Index*) ao longo do período de 2014 a 2024, complementada por uma curva de tendência.

Gráfico 10 - Evolução das Médias Anuais de NDWI (2014-2024).



No caso da presente análise, todos os valores médios do NDWI ao longo do intervalo temporal encontram-se positivos (entre aproximadamente 0,074 e 0,113), o que indica uma presença relativa de alvos mais úmidos no balanço espectral da bacia — seja por maior contribuição de cobertura vegetada com maior teor de água, seja por umidade superficial em fundos de vale e áreas ripárias. Ainda assim, trata-se de uma faixa numérica relativamente estreita, sugerindo que as variações interanuais correspondem mais a oscilações na umidade/vegetação do que a uma expansão contínua de água superficial.

A trajetória da curva azul revela uma oscilação significativa da média do NDWI ano a ano, com destaque para os seguintes aspectos:

- De 2014 a 2016: houve tendência de aumento, culminando em 2016 com um dos maiores valores da série ($\approx 0,111$), o que pode refletir condições mais úmidas no período e/ou maior vigor e teor de água na vegetação;
- De 2017 a 2018: ocorreu queda, com 2018 apresentando uma das médias mais baixas do início da série ($\approx 0,086$), compatível com redução relativa da umidade superficial e/ou simplificação da cobertura vegetal em parte da bacia;
- De 2018 a 2020: observa-se uma sequência de forte contraste, com pico em 2019 (máximo da série, $\approx 0,113$) seguido de queda abrupta em 2020 (mínimo

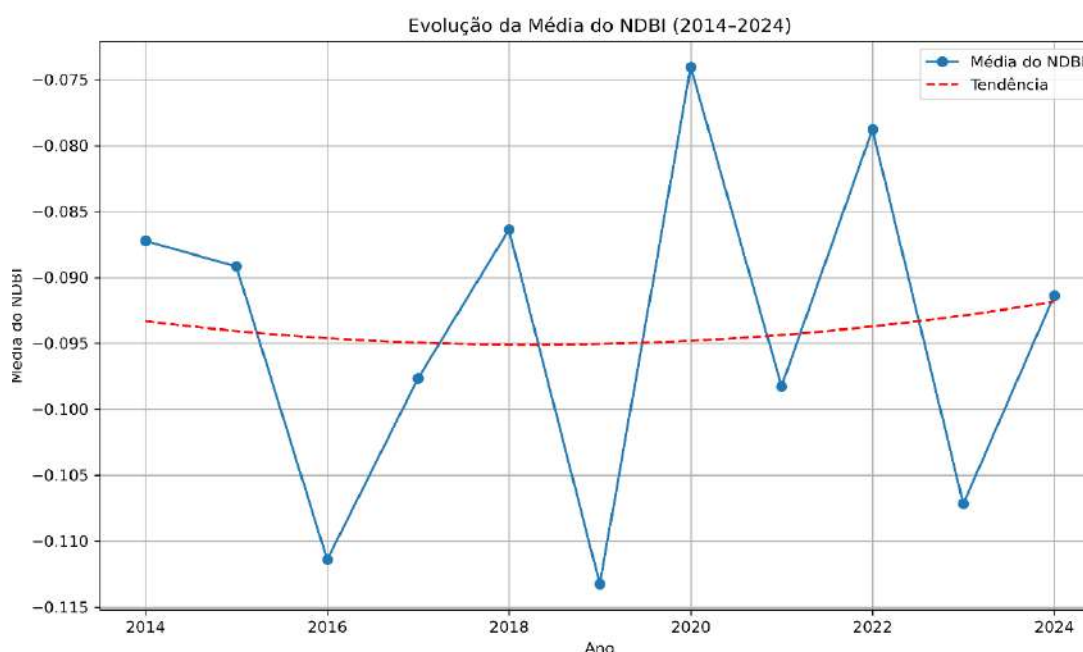
da série, $\approx 0,074$), padrão que sugere alta sensibilidade do índice a mudanças interanuais de precipitação/sazonalidade e/ou a alterações localizadas de cobertura e exposição do solo;

- De 2021 a 2024: há um comportamento oscilante, com recuperação em 2021 ($\approx 0,098$), nova queda em 2022 ($\approx 0,079$), novo pico em 2023 ($\approx 0,107$) e redução em 2024 ($\approx 0,091$), indicando alternância entre anos relativamente mais úmidos e mais secos, sem estabilização em patamar elevado.

A curva de tendência (vermelha tracejada) ilustra um comportamento em “U” invertido, com leve ascensão até meados da série (≈ 2018 – 2019) e discreta redução em direção a 2024, sinalizando que, apesar da variabilidade interanual acentuada, o nível médio de umidade detectado pelo NDWI se mantém globalmente estável, sem evidência de melhora sustentada ao longo da década analisada.

O Gráfico 11 apresenta a série temporal das médias anuais do NDBI na bacia do Ribeirão Brandão ao longo do período de 2014 a 2024, com sobreposição de uma curva de tendência.

Gráfico 11 - Evolução das Médias Anuais de NDBI (2014-2024)



Na presente análise, os valores médios de NDBI para todos os anos da série foram negativos, oscilando entre aproximadamente -0,115 e -0,08. Esta característica pode ser explicada pelo efeito de escala da média espacial, uma vez que a bacia

engloba amplas porções com vegetação ou solo exposto — o que dilui, na média, o peso espectral das áreas urbanizadas.

A linha azul revela uma flutuação acentuada da média do NDBI ao longo da série, com destaque para os seguintes pontos:

- 2016 e 2019 apresentam os valores mais baixos da série (cerca de -0,115), sugerindo maior presença relativa de cobertura vegetada ou solo nu com baixo índice de construção;
- 2020 e 2022 atingem os valores mais altos (cerca de -0,08), indicando maior proporção relativa de superfícies impermeáveis ou edificações detectadas via sensoriamento remoto;
- A oscilação brusca entre os anos, como entre 2019–2020 e 2022–2023, indica que pequenas alterações na paisagem urbana (como novas construções ou desmatamento em áreas periféricas) afetam significativamente o índice, sobretudo em recortes espaciais pequenos como bacias hidrográficas urbanas.

A curva de tendência (em vermelho tracejado) revela uma inflexão suave e ascendente a partir de meados da série, sugerindo uma leve tendência de aumento na proporção de áreas com maior reflectância SWIR, compatível com expansão urbana ou substituição de solos vegetados por superfícies impermeáveis.

6.7. Identificação de tendências de transformação fluvial

Nas figuras Figura 24, Figura 25 e Figura 26 são apresentadas as características de confinamento dos principais coletores da bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão, identificadas por Almeida (2021). Segundo estes autores;

- a) Nos canais confinados, as margens do canal fluvial coincidem com as margens do vale, as quais, portanto, confinam o canal, podendo também haver confinamento por rodovias, estradas ou edificações, ou seja, o confinamento pode ser antropogênico ou natural, e por diferentes elementos;
- b) Os canais parcialmente confinados apresentam maior diversidade morfológica, com a presença de barras laterais ou longitudinais e depósitos sedimentares que sustentam *habitats* diversificados;
- c) Nos canais não confinados, todas as margens do canal possuem planície de inundação contínua e sem nenhum elemento confinante visível;

- d) Os canais esporadicamente confinados apresentam margens de canais com planícies de inundação contínuas e limitadas em poucos trechos por terraços baixos; podem ter padrão meândrico em alguns trechos.

A análise conjunta dos mapas de uso e cobertura da terra com os índices NDVI, NDWI e NDBI evidencia uma trajetória dominante de transformação das superfícies na bacia do Ribeirão Brandão que tende a conduzir, em diferentes ritmos e intensidades, as áreas arborizadas em direção a condições urbanizadas. Essa trajetória não se resume a uma substituição direta entre “verde” e “cimento”, mas envolve um encadeamento de estados intermediários que podem ser espacialmente reconhecidos e quantificados. No contexto da bacia, a vegetação rasteira aparece como classe de origem e de matriz da paisagem – resultado de um longo processo de substituição das antigas formações florestais por pastagens e capoeiras – e permanece amplamente distribuída ao longo de encostas e interflúvios. No entanto, o ponto de inflexão dessa sequência é o solo exposto: é na passagem vegetação rasteira → solo exposto que se concentram os fluxos de mudança mais expressivos e que se definem, em grande medida, as possibilidades de evolução futura de cada porção do território. Os resultados das matrizes de transição mostram que as maiores áreas de conversão se dão precisamente nesse sentido, indicando que a remoção da cobertura herbácea funciona como etapa inicial tanto da intensificação da degradação geomorfológica das encostas quanto da preparação de terrenos para usos urbanos e infraestruturais.

Do ponto de vista espectral, essa trajetória é capturada pela combinação dos índices: à medida que superfícies originalmente arbóreas ou recobertas por vegetação rasteira perdem biomassa e têm sua estrutura simplificada, os valores de NDVI diminuem, refletindo a redução da atividade fotossintética e da densidade de dossel. Paralelamente, o NDWI tende a assumir valores mais baixos, evidenciando perda de umidade superficial e maior exposição do solo aos processos de escoamento e insolação. Em muitos casos, essa conversão para solo exposto é acompanhada por um aumento dos valores de NDBI, uma vez que os alvos passam a ser dominados por materiais minerais secos, cortes de talude, aterros e superfícies preparadas para receber edificações, vias ou pátios. O solo exposto assume, assim, o papel de classe-chave dessa cadeia de transformação: ele concentra a maior diversidade de fluxos de mudança, pois tanto pode evoluir para o urbano – quando se consolidam loteamentos, condomínios, vias ou estruturas industriais – quanto retornar à vegetação rasteira em

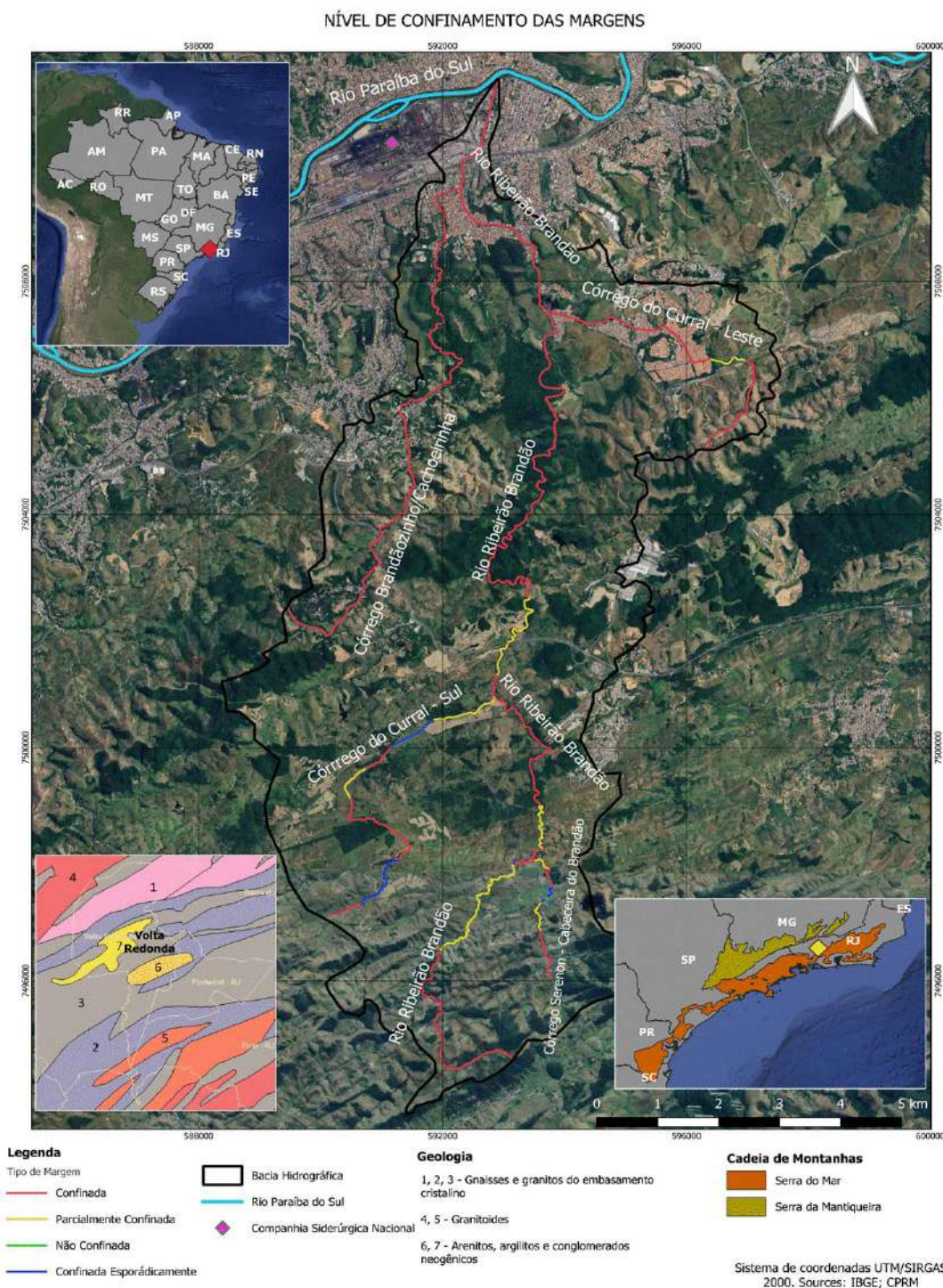
situações pontuais de abandono ou de revegetação espontânea/induzida. No intervalo de dez anos aqui considerado, os mapas de transição deixam claro que é nesse estágio intermediário que se decide, em termos espaciais, se um determinado setor da bacia avançará em direção à urbanização ou permanecerá em um patamar de uso predominantemente rural, ainda que marcado por degradação.

Quando essa leitura espectral é articulada com a tipificação do confinamento dos canais previamente estabelecida no âmbito da abordagem River Styles, o diagnóstico ganha profundidade e avança para além de uma simples oposição entre “rural” e “urbano”. A sobreposição dos índices com os tipos e graus de confinamento permite identificar, dentro de um mesmo domínio de uso rural, trechos com comportamentos muito distintos: há segmentos de médio e alto curso em que a vegetação rasteira se mantém relativamente estável e associada a margens pouco modificadas, preservando conectividade lateral mínima; e há segmentos em que o avanço do solo exposto ocorre exatamente sobre margens parcialmente ou fortemente antropizadas, indicando aumento de pressão sobre a estabilidade dos taludes, sobre a capacidade de dissipação de energia das cheias e sobre a recarga hídrica local. Nos trechos urbanos de baixo curso, por sua vez, os índices evidenciam que o cenário não se limita a áreas já consolidadas, mas configura um mosaico em que plataformas de obra, taludes recentes e superfícies desnudas funcionam como frentes ativas de expansão urbana e de confinamento adicional das margens, reforçando a desconectividade hidrológica e reduzindo ainda mais o espaço de ajuste dos canais.

Nessa perspectiva, o uso combinado dos índices NDVI, NDWI e NDBI com a tipificação de confinamento não busca refazer a caracterização dos estilos fluviais já produzida em trabalhos anteriores, mas operar sobre essas categorias para produzir um “raio-x” espacial da bacia. Esse enquadramento permite indicar, com maior precisão, quais trechos, segmentos ou setores se encontram sob maior pressão antrópica, quais mantêm condições relativamente mais preservadas e onde a sequência vegetação arbórea → vegetação rasteira → solo exposto → urbano está mais ativa e avançada. Em outras palavras, a integração entre sensoriamento remoto e River Styles fornece um quadro em que não apenas se distingue rural de urbano, mas se reconhecem gradações internas de transformação, intensidade de degradação e potencial de mudança futura. Esse quadro oferece um primeiro nível de priorização de áreas para ações de manejo, restauração e planejamento urbano: em

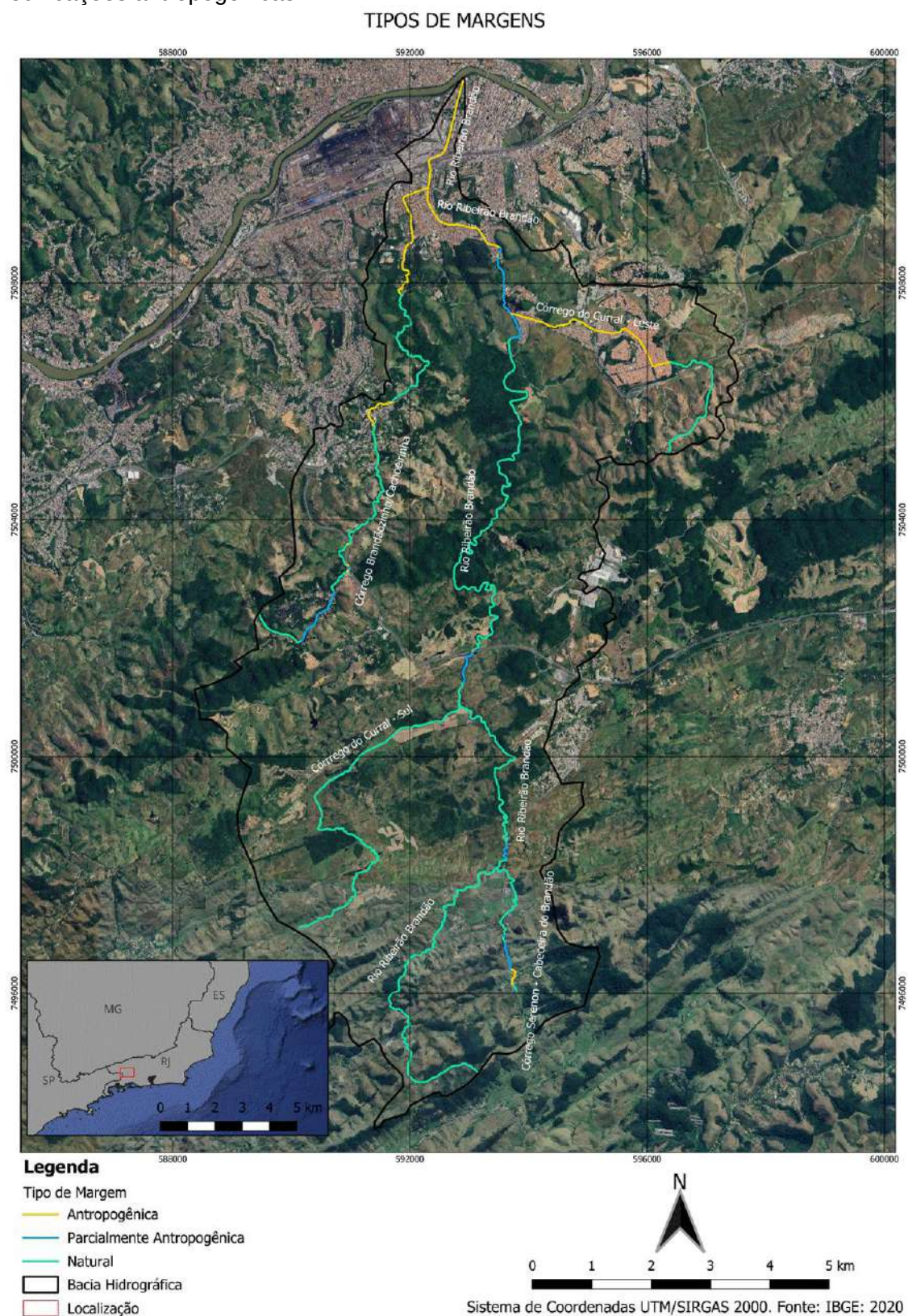
um contexto de recursos limitados, ele ajuda a responder onde a redução do solo exposto e a recomposição de cobertura vegetal podem produzir efeitos mais rápidos sobre a estabilidade das encostas e das margens, e onde, ao contrário, a consolidação das obras e da impermeabilização já impõe limites mais rígidos à recuperação espontânea dos sistemas fluviais.

Figura 24 - Tipos de margens de canal dos coletores principais do Ribeirão Brandão, segundo o grau de confinamento das do Rio Paraíba do Sul em Volta Redonda (RJ).



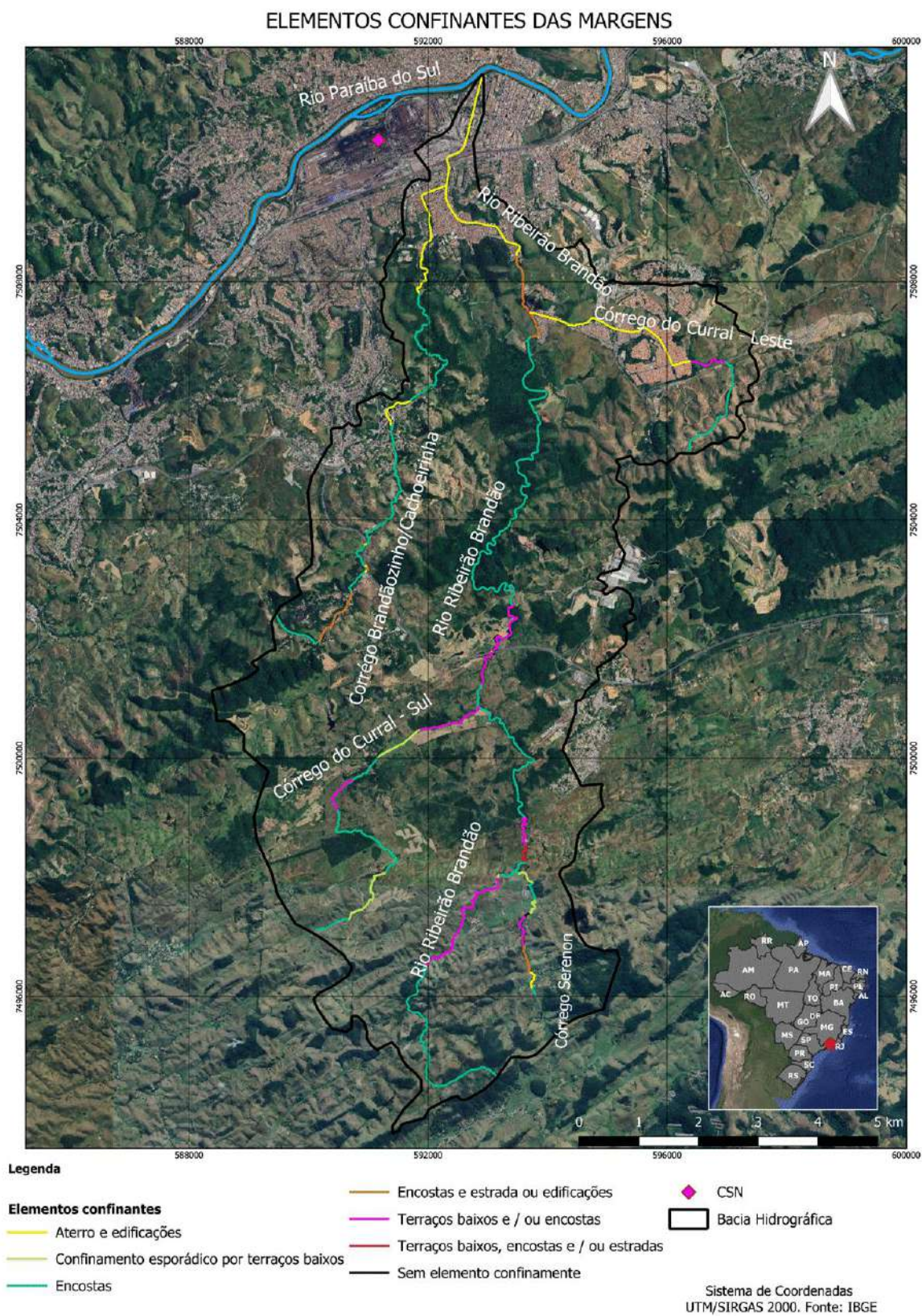
Fonte: Almeida (2022).

Figura 25 - Tipo de confinamento das margens de canal dos coletores principais do Ribeirão Brandão, afluente do Rio Paraíba do Sul em Volta Redonda (RJ), segundo o grau de modificações antropogênicas.



Fonte: Almeida (2022).

Figura 26- Elementos confinantes das margens de canal dos coletores principais do Ribeirão Brandão, afluente do Rio Paraíba do Sul em Volta Redonda (RJ).



Fonte: Almeida (2022).

Com o objetivo de sintetizar a lógica integrativa do trabalho, apresenta-se a seguir um quadro-síntese (Tabela 3) que relaciona as assinaturas espectrais, as trajetórias de mudança na cobertura e uso da terra e sua expressão plausível na organização das margens e do confinamento dos canais, permitindo interpretar implicações geomorfológicas associadas.

Tabela 3- Quadro Síntese

Assinatura espectral (combinação)	Leitura de condição	Trajetoária dominante
Vegetação alta + umidade relativamente maior + baixa artificialização (Índice de Vegetação ↑; Índice de Água ↑/menos negativo; Índice de Área Construída ↓/mais negativo)	Condição mais funcional do ponto de vista eco-hidrológico, com maior capacidade de amortecimento superficial	Arborizada → manutenção (ou arborizada/rasteira → arborizada)
Vegetação intermediária em mosaico + umidade baixa/moderada + baixa/média artificialização (Índice de Vegetação médio; Índice de Água baixo/negativo; Índice de Área Construída negativo porém menos intenso)	Condição intermediária/ estável frágil, típica de matriz campestre/ periurbana	Vegetação rasteira → manutenção (com conversões localizadas)
Queda de vegetação + queda de umidade + aumento de artificialização (Índice de Vegetação ↓; Índice de Água ↓; Índice de Área Construída ↑, aproximando-se de 0 ou positivo localmente)	Condição de pressão antrópica crescente, associada a adensamento e impermeabilização	Rasteira → urbano (direta ou mediada por “solo exposto”)
Vegetação baixa + umidade baixa + artificialização baixa a média, porém com assinatura “mineral” dominante (Índice de Vegetação ↓; Índice de Água ↓; Índice de Área Construída variável, muitas vezes ainda negativo)	Condição instável/transitória, típica de superfícies recém-expostas ou em transformação	Rasteira → solo exposto (passo crítico da sequência)
Solo exposto persistente + baixa umidade + vegetação baixa (Índice de Vegetação muito baixo; Índice de Água baixo; Índice de Área Construída baixo/médio)	Condição crônica de degradação superficial, com baixa resiliência imediata	Solo exposto → persistência (sem retorno claro)
Umidade relativamente maior em faixas estreitas + vegetação moderada (Índice de Água ↑)	Condição ripária/local com função hidrológica parcial	Recuperação localizada (solo exposto/rasteira →

local; Índice de Vegetação ↑ moderado; Índice de Área Construída baixo)		rasteira/arborizada em faixas)
Alta artificialização + baixa vegetação + baixa umidade (Índice de Área Construída ↑; Índice de Vegetação ↓; Índice de Água ↓)	Condição altamente restritiva para processos naturais e para recuperação espontânea	Solo exposto → urbano e urbano → manutenção (núcleo consolidado)
Sinal “misto” em bordas urbanas (pixel misto) (índices com respostas intermediárias e oscilantes)	Condição ambígua do ponto de vista espectral; exige interpretação cautelosa	Pode simular urbano → não urbano ou “ganho arbóreo” sem mudança estrutural real

6.8. Integração entre índices espectrais e confinamento fluvial

A integração entre os índices espectrais e a tipificação geomorfológica dos canais permitiu aprofundar a interpretação das transformações espaciais observadas na bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão, superando leituras isoladas dos indicadores de vegetação, umidade superficial e artificialização. A análise conjunta dos mapas de Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) e Índice de Área Construída por Diferença Normalizada (NDBI) com a classificação de confinamento do vale e tipologia das margens revelou padrões espaciais consistentes, associados a diferentes níveis de pressão antrópica e de restrição geomorfológica ao longo da rede de drenagem.

Nos trechos caracterizados por margens naturais ou pouco modificadas, sobretudo em setores de médio e alto curso da bacia, os índices espectrais tendem a apresentar valores relativamente mais elevados de NDVI e menores valores de NDBI, indicando maior continuidade da cobertura vegetal e menor presença de superfícies impermeáveis. Nesses segmentos, embora o NDWI permaneça predominantemente negativo, observa-se menor fragmentação espacial da umidade superficial, sugerindo condições relativamente mais favoráveis à infiltração e à manutenção de processos hidrológicos locais. Esses padrões ocorrem, em geral, em contextos de confinamento geomorfológico controlado por encostas e terraços, com menor interferência direta de estruturas tecnogênicas sobre o corredor fluvial.

Em contraste, nos trechos classificados com margens parcialmente ou fortemente antropizadas, especialmente nos setores de baixo curso e em áreas urbanizadas, verifica-se a convergência de valores mais elevados de NDBI, redução do NDVI e fragmentação acentuada do NDWI. Essa combinação indica a dominância

de superfícies construídas e solo exposto, associada à simplificação estrutural da cobertura vegetal e à redução da umidade superficial. Esses padrões espectrais coincidem espacialmente com segmentos de confinamento tecnogênico, nos quais a presença de canalizações, muros de contenção, aterros e edificações restringe o espaço de ajuste lateral do canal e limita a interação entre o curso d'água e sua planície de inundação.

A sobreposição dos índices com os tipos de confinamento evidencia que a leitura espectral responde de forma mais intensa nos trechos onde a intervenção antrópica atua diretamente sobre as margens e o fundo de vale. Nessas áreas, a sequência de transformação da cobertura do solo — vegetação arbórea → vegetação rasteira → solo exposto → superfícies urbanizadas — mostra-se mais ativa e espacialmente concentrada, refletindo frentes recentes de expansão urbana, obras de terraplanagem e reorganização do uso do solo. Em particular, o solo exposto emerge como elemento-chave dessa transição, funcionando como estágio intermediário entre a remoção da cobertura vegetal e a consolidação da infraestrutura urbana.

No domínio rural, a integração dos dados revela maior heterogeneidade interna do que aquela sugerida por uma simples oposição entre áreas urbanas e não urbanas. Mesmo em setores classificados como rurais, a combinação entre índices espectrais e tipologia de margens permite distinguir trechos relativamente estáveis, associados a margens pouco modificadas, daqueles em que o avanço do solo exposto ocorre sobre margens parcialmente antropizadas, indicando aumento de pressão sobre a estabilidade dos taludes, sobre a dissipação de energia das cheias e sobre a recarga hídrica local. Essa diferenciação interna evidencia que processos de transformação não se distribuem de forma homogênea no território, mas se organizam segundo condicionantes geomorfológicos e históricos específicos.

Na sub-bacia do Córrego do Curral-Leste, a leitura integrada destacou padrões representativos das transformações em curso na bacia como um todo. Os mapas de transição indicam que a vegetação rasteira atua como categoria altamente dinâmica, alimentando tanto processos de degradação, por conversão em solo exposto, quanto processos de recomposição localizada, por conversão em áreas arborizadas. A associação desses padrões com margens parcial ou fortemente modificadas reforça o papel do confinamento tecnogênico como fator de amplificação das respostas espectrais à pressão antrópica.

De modo geral, a integração entre os índices NDVI, NDWI e NDBI com a tipificação de confinamento e margens não teve como objetivo redefinir os estilos fluviais previamente caracterizados em estudos anteriores, mas operar sobre essas categorias para produzir uma leitura espacial integrada das transformações em curso. Essa abordagem permitiu identificar gradações internas de modificação da paisagem fluvial, localizar setores sob maior pressão antrópica e reconhecer trechos com maior estabilidade relativa, oferecendo um “raio-x” espacial da bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão no período analisado.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação teve como propósito contribuir para o diagnóstico de transformações na bacia hidrográfica do Ribeirão Brandão (Volta Redonda – RJ), partindo da premissa de que rios e paisagens associadas constituem sistemas dinâmicos e interdependentes, cujas respostas são condicionadas por trajetórias históricas de ocupação. No Médio Vale do Rio Paraíba do Sul, a substituição de coberturas florestais por usos agropecuários e, posteriormente, o avanço urbano-industrial associado à instalação da CSN consolidaram uma paisagem marcada por fragmentação e forte heterogeneidade espacial. Nessa bacia, a alternância entre vegetação rala, áreas de solo exposto e superfícies edificadas expressa não apenas mudanças recentes, mas também um legado acumulado de pressões sucessivas sobre encostas, fundos de vale e corredores fluviais. Assim, mesmo quando a série temporal sugere estabilidade, tal padrão deve ser interpretado como permanência de um patamar intermediário de transformação — e não como ausência de degradação ou de pressão antrópica.

O arcabouço dos Estilos de Rio foi adotado como base conceitual para sustentar a leitura geomorfológica e a discussão sobre confinamento e margens, mas a pesquisa não teve como objetivo caracterizar estilos fluviais na bacia na fase atual das investigações. A contribuição do trabalho concentra-se em operacionalizar a articulação entre (i) a tipificação/diagnósticos geomorfológicos previamente produzidos para o sistema fluvial e (ii) métricas derivadas de sensoriamento remoto, estruturadas em série temporal e interpretadas por meio de estatísticas e correlações entre índices. Nessa perspectiva, a dissertação reforça como leituras geomorfológicas podem dialogar com indicadores espectrais para sustentar interpretações sobre

condição de bacia, pressões territoriais e trajetórias de transformação, com potencial de replicação em bacias urbanizadas e periurbanas de porte semelhante.

Os resultados apontaram baixa variabilidade temporal nas médias anuais dos índices espectrais e um conjunto de assinaturas coerentes com: (a) predominância de cobertura vegetal rasteira e descontínua, com remanescentes mais densos espacialmente restritos; (b) condição recorrente de baixa umidade superficial, compatível com desconexões e limitações funcionais em setores da bacia; e (c) artificialização em estágio intermediário, expressa por um mosaico de infraestrutura urbana, solo exposto e vegetação rala. Além disso, as relações entre índices evidenciaram padrões consistentes com a competição entre cobertura vegetal e superfícies construídas e com a relevância do solo exposto como categoria de transição e de pressão recente em setores específicos. Em conjunto, esses achados sustentam a interpretação de que a bacia mantém pressões persistentes e apresenta limitações estruturais para recuperação espontânea em trechos onde a modificação de margens e fundos de vale já se encontra consolidada.

As limitações do estudo decorrem, sobretudo, da escala do sensor e do contexto de ocupação fragmentada. A resolução espacial do Landsat (30 m) pode introduzir mistura espectral em pixels que combinam simultaneamente gramíneas, árvores isoladas, solo exposto e elementos construídos, afetando tanto a classificação de uso/cobertura quanto a leitura de mudanças em áreas de transição. Por essa razão, conversões pontuais entre classes e oscilações localizadas devem ser interpretadas com cautela, em especial quando envolvem parcelas pequenas em comparação ao comportamento geral da bacia. Ainda assim, a consistência interna da série temporal, o controle de qualidade das cenas utilizadas e a padronização do processamento conferem robustez aos padrões gerais identificados e às comparações temporais realizadas, justificando o uso dos resultados como leitura de tendência e como suporte para análises integradas em escala de bacia.

Como desdobramentos, recomenda-se avançar na validação e no refinamento espacial por meio da incorporação de sensores de maior resolução (por exemplo, Sentinel-2) e de estratégias de verificação pontual em setores críticos de transição, com foco em áreas onde a interpretação espectral é mais sensível à mistura de alvos. Também há oportunidades de integrar os produtos obtidos com modelagem hidrológica e sedimentológica, de modo a explorar cenários de geração de escoamento e transporte de sedimentos sob diferentes condições de uso e cobertura.

Em paralelo, abordagens de classificação por aprendizado de máquina podem contribuir para reduzir ambiguidades em ambientes heterogêneos e para aprimorar a identificação de padrões de ocupação e de corredores ripários. Por fim, a incorporação de dimensões socioambientais — incluindo registros locais, percepção de risco e indicadores de vulnerabilidade — pode ampliar a capacidade explicativa do diagnóstico e aproximar a leitura biofísica dos impactos vivenciados por comunidades inseridas na bacia. Dessa forma, o trabalho encerra-se reafirmando o valor de diagnósticos integrados e replicáveis como base para leituras comparativas, comunicação de evidências e construção de agendas futuras de pesquisa e gestão territorial em sistemas fluviais sob pressão.

8. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L. C. F. H. Alterações antropogênicas em margens de canais fluviais da bacia do Ribeirão Brandão – Volta Redonda, Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (RJ). 2021. Monografia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

ALMEIDA, L. C. F. H.; MELLO, E. V.; PEIXOTO, M. N. O. Modificações tecnogênicas em canais fluviais associadas à urbanização: Bacia do Ribeirão Brandão, Volta Redonda, RJ. In: BARBOSA DOS SANTOS, G.; FELIPPE, M. F.; MARQUES NETO, R. (org.). *Geomorphology of Brazil: Complexity, Interscale and Landscape*. Cham: Springer, 2022. p. 145-160. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-05178-4_12.

ALMEIDA, L. C. F. H.; ROTUNNO FILHO, O. C.; MOURA, A. M. A.; SAMPAIO, R. J. Uso de imagens Landsat para o monitoramento de partículas sólidas em suspensão em trechos de implantação das usinas hidroelétricas do rio Madeira. 2020.

BEAZLEY, D.; JONES, B. K. *Python Cookbook: Recipes for Mastering Python 3*. Sebastopol: O'Reilly Media, 2013.

BEDÊ, W.A. s ocial. BELLIA, V. Volta Redonda na era Vargas (1941-1964): história Volta Redonda: Ed. Prefeitura de Volta Redonda. 148p. 2004

BRIERLEY, G. J.; FRYIRS, K. A. *Geomorphology and River Management: Applications of the River Styles Framework*. Malden: Blackwell Publishing, 2005.

CASTRO, C.M. 19, p.279-292. . São Paulo: ed. Vulnerabilidade em sistemas hídricos e riscos ambientais em Volta Redonda, Rio de Janeiro. 2004. 114p. Dissertação (Mestrado em Geografia), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

COHEN, J. *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. 2. ed. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates, 1988.

CORRÊA, R.L. Trajetórias geográficas. Rio de Janeiro: Ed. Bertrand Rio de Janeiro: Ed. Bertrand Brasil. 304p. 2001

COSTA, C.M.L.; RISBO, R.T.; RILLAS, E.H. memórias de Dom Waldyr Calheiros. 2001

DANTAS, M.E. Controles naturais e antropogênicos da estocagem diferencial de sedimentos fluviais: bacia do rio Bananal (SP/RJ), médio vale do rio Paraíba do Sul. 142 p. 1995. Dissertação (Mestrado em Geografia), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGG/UFRJ), 1995.

DEAN, W. A ferro e fogo: a história e a devastação da mata atlântica brasileira. São Paulo: Cia. das Letras, 484 p. 1996.

DEL POZO, I. F. Modelagem de conectividade da paisagem com base na análise espacial de variáveis geomorfológicas e cobertura da terra em bacias hidrográficas – municípios de Volta Redonda e Pinheiral (RJ). 2011. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

ESRI. *ArcPy: Python scripting for ArcGIS*. 2023. Disponível em: <https://pro.arcgis.com>. Acesso em: 4 jan. 2025.

ESRI. ArcPy Overview. Disponível em: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/arcpy/get-started/what-is-arcpy-.htm>. Acesso em: 4 jan. 2025.

ESRI. Cell Statistics (Spatial Analyst). Disponível em: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/cell-statistics.htm>. Acesso em: 4 jan. 2025.

ESRI. Clip Raster. Disponível em: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/data-management/clip.htm>. Acesso em: 4 jan. 2025.

FIGUEIREDO, L. C. Modificações tecnogênicas na morfologia de cabeceiras de drenagem em anfiteatro - Setor Sul/Centro Sul de Volta Redonda (RJ). 2024. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

GAO, B. C. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, v. 58, n. 3, p. 257-266, 1996. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3).

HOSSAIN, M.; MONIRUZZAMAN, M.; AHMED, R. Urbanization and its impact on the environment: A case study of Dhaka city using NDBI and NDVI. *Environmental Challenges*, v. 10, p. 100-110, 2019.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, v. 83, n. 1-2, p. 195-213, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)

HUNTER, J. D. Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, v. 9, n. 3, p. 90-95, 2007.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/zona-de-convergencia-do-atlantico-sul-zcas>. Acesso em: 16 ago. 2025.

JENSEN, J. R. *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007.

KUMAR, M.; MONTEITH, J. L. Remote sensing of crop growth. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*, v. 301, n. 1463, p. 149-167, 1981.

LANG, S.; TIEDE, D.; HÖBLING, D. Earth Observation for Habitat Mapping. In: *Springer Handbook of Geographic Information*. Springer, 2013.

LI, J.; SHENG, Y.; LUO, J. A new method for mapping water bodies with a normalized difference water index. *International Journal of Remote Sensing*, v. 34, n. 15, p. 5360-5380, 2013. <https://doi.org/10.1080/01431161.2013.788263>.

LILLESAND, T.; KIEFER, R.; CHIPMAN, J. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 7. ed. Hoboken: Wiley, 2015.

LIMA, R.G.S. Volta Redonda do café e do leite. Prefeitura de Volta Redonda. 70p. 2004.

LOPES, A.C. A aventura da cidade industrial de Tony Garnier em Volta Redonda. 235p. 1993. Dissertação (Mestrado em Geografia), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro

MCKINNEY, W. Data structures for statistical computing in Python. In: *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, 2010.

MCFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, v. 17, n. 7, p. 1425-1432, 1996. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>.

MELLO, C. L. Fácies Sedimentares, Arquitetura Depositional e Relações Morfoestratigráficas em um Sistema de Leques Aluviais Holocênicos: Aloformação Manso – Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (SP/ RJ). 1992. 188 p. Dissertação (Mestrado em Geologia). Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MELLO, E. V. Impactos geomorfológicos em sistemas fluviais no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul: dinâmica de urbanização e industrialização. 2006. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

MELLO, E. V. Volta Redonda e CSN: símbolos do Antropoceno no Brasil. 2022. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

MOURA, J. R.; MELLO, C.L. Geomorfologia aplicada à análise da evolução ambiental na bacia do Paraíba do Sul. In: *Anais do Congresso Brasileiro de Geomorfologia*, São Paulo, 1991.

MOURA, J. R.; MELLO, C.L.; PEIXOTO, M. N. Eventos deposicionais quaternários na bacia do Médio Paraíba do Sul: implicações para a dinâmica sedimentar. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 1991.

NASA. 16-Day Vegetation Index. Scientific Visualization Studio (SVS), 2013. Disponível em: <https://svs.gsfc.nasa.gov/30375/>. Acesso em: 16 ago. 2025.

NEGRÃO, T. Formações sedimentares do Médio Vale do Paraíba do Sul: contexto geológico e implicações geomorfológicas. *Boletim de Geociências do Sudeste Brasileiro*, 2015.

PEIXOTO, M. N. O. Evolução do relevo, coberturas sedimentares e formação de solos em superfícies geomorfológicas – Médio Vale do rio Paraíba do Sul (SP/RJ). 192p. Dissertação (Mestrado em Geografia), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 1993

PEIXOTO, M. N. O. Estocagem de sedimentos em cabeceiras de drenagem em anfiteatro – Médio Vale do rio Paraíba do Sul (SP/RJ). 197p. 2002. Tese (Doutorado em Geografia) Programa de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2002.

PEKEL, J. F.; COTTAM, A.; GORELICK, N.; BELWARD, A. S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, v. 540, p. 418-422, 2016. <https://doi.org/10.1038/nature20584>.

PELECH, A. S. Classificação geomorfológica de rios e mapeamento geomorfológico: construção de taxonomia de relevo e aplicação multiescalar na Região Hidrográfica da Baía de Guanabara (RJ). 2023. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

PELECH, A.; PEIXOTO, M. N. O. Rios urbanos: contribuição da antropogeomorfologia e dos estudos sobre os terrenos tecnogênicos. *Revista Brasileira de Geografia*, v. 65, n. 1, p. 2-22, 2020.

PENG, J.; LIU, Y.; WANG, Y.; CHEN, Y. Urban vegetation cover change and its relationship with urbanization in a coastal city in China. *Ecological Indicators*, v. 11, n. 6, p. 1544–1553, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.03.021>

PETTORELLI, N.; VIK, J. O.; MYSTERUD, A.; GAILLARD, J. M.; TUCKER, C. J.; STENSETH, N. C. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, v. 20, n. 9, p. 503-510, 2005. DOI: [10.1016/j.tree.2005.05.011](https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011)

PINTO, S.; MELLO, E.V.; PEIXOTO, M.N.O.; MOURA, J.R.S. Relações entre comportamento de feições erosivas e movimentos gravitacionais de massa e as transformações recentes nos sistemas de drenagem em Volta Redonda (RJ). In: SIMP. BRAS. GEOG. FISICA APLIC Paulo, São Paulo, 2005. (CD-ROM).

PIQUET, R. Volta Redonda: um exemplo clássico de cidade-empresa Cidade-empresa: Presença na paisagem urbana brasileira. de Janeiro: Ed. Jorge Zahar. 166p. 1998

PMVR – PREFEITURA MUNICIPAL DE VOLTA REDONDA 130p. Informações municipais de Volta Redonda. 2002

RIBEIRO, A. S. Caracterização geomorfológica, sedimentológica e da vegetação de canais embrejados na bacia Córrego Santa Rita, município de Volta Redonda (RJ). 2016. 148p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós- Graduação em Geografia – PPGG, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 2016.

RICHARDS, J. A.; JIA, X. *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*. 4. ed. Berlin: Springer, 2006.

ROUSE, J. W. et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings of the Earth Resources Technology Satellite Symposium*, v. 1, p. 309-317, 1974.

ROY, D. P.; WULDER, M. A.; LOVELAND, T. R.; WOODCOCK, C. E.; ALLEN, R. G.; ANDERSON, M. C.; HELDER, D.; IRONS, J. R.; JOHNSON, D. M.; KENNEDY, R.; SCAMBOS, T. A.; SCHAAF, C. B.; SCHOTT, J. R.; SHENG, Y.; VERMOTE, E. F.; BELWARD, A. S.; BINDSCHADLER, R.; COHEN, W. B.; GAO, F.; HIPPLE, J. D.; ZHU, Z. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, v. 145, p. 154-172, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>

RUNNING, S. W.; NEMANI, R. R.; HEINSCH, F. A.; ZHAO, M.; REEVES, M.; HASHIMOTO, H. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *BioScience*, v. 54, n. 6, p. 547-560, 2004. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2004\)054\[0547:ACSMOG\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0547:ACSMOG]2.0.CO;2)

SALGADO, C. M. *Erodibilidade de coberturas sedimentares/pedológicas e variabilidade espacial de propriedades pedológicas físicas em cabeceiras de drenagem em anfiteatro*. 132 p. 1996. Dissertação (Mestrado em Geografia), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SANTOS, I. M. Mapeamento De Feições Depositionais Quaternárias No Gráben De Casa De Pedra (Bacia Sedimentar De Volta Redonda, RJ) Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. 2016.

- SILVA, T.M. Estruturação geomorfológica do Planalto Atlântico no estado do Rio de Janeiro. 243p. 2002. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2002.
- SHUMWAY, R. H.; STOFFER, D. S. *Time Series Analysis and Its Applications*. 4. ed. New York: Springer, 2017.
- SILVERMAN, B. W. *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. London: Chapman and Hall, 1986.
- STODDEN, V.; GUO, P.; LEISCH, F. *Implementing Reproducible Research*. CRC Press, 2012.
- TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, v. 8, p. 127-150, 1979.
- TUKEY, J. W. *Exploratory Data Analysis*. Reading: Addison-Wesley, 1977.
- USGS. *Landsat 8 Surface Reflectance Code (LaSRC) Product Guide*. United States Geological Survey, 2021.
- WENG, Q. A remote sensing–GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface temperature in the Zhujiang Delta, China. *International Journal of Remote Sensing*, v. 22, n. 10, p. 1999-2014, 2001.
- WHEATON, J. M.; FRYIRS, K. A.; BRIERLEY, G.; BANGEN, S. G.; BOUWES, N.; O'BRIEN, G. Geomorphic mapping and taxonomy of fluvial landforms. *Geomorphology*, v. 248, p. 273-295, 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.07.010>.
- WILKINSON, L.; FRIENDLY, M. The history of the cluster heat map. *The American Statistician*, v. 63, n. 2, p. 179-184, 2009.
- WULDER, M. A.; MASEK, J. G.; COHEN, W. B.; LOVELAND, T. R.; WOODCOCK, C. E. Opening the archive: How free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat. *Remote Sensing of Environment*, v. 122, p. 2-10, 2012.
<https://research.fs.usda.gov/treesearch/42465>
- XU, H. Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, v. 27, n. 14, p. 3025-3033, 2006.
- XU, H. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, v. 29, n. 14, p. 4269-4276, 2008.
- ZHA, Y.; GAO, J.; NI, S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, v. 24, n. 3, p. 583-594, 2003.

ZHANG, X.; FRIEDL, M. A.; SCHAAF, C.; STRAHLER, A. H.; HODGES, J.; GAO, F.; REED, B. C.; HUETE, A. Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, v. 84, n. 3, p. 471-475, 2003. DOI: [10.1016/S0034-4257\(02\)00135-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00135-9)

ANEXOS

Tabela 4 - Tabela de Imagens

Ano	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
2014	LC08_L2SP _217076_20	LC08_L2SP _218076_20	LC08_L2SP _217076_20	LC08_L2SP _218075_20	LC08_L2SP _218076_20	LC08_L2SP _218075_20	LC08_L2SP _217076_20	LC08_L2SP _218076_20	LC08_L2SP _217076_20	LC08_L2SP _218075_20		LC08_L2SP _217076_20
	140125_202	140201_202	140314_202	140422_202	140508_202	140625_202	140704_202	140812_202	140922_202	141015_202		141227_202
	00912_02_T	00912_02_T	00911_02_T	00911_02_T	00911_02_T	00911_02_T	00911_02_T	00911_02_T	00911_02_T	00910_02_T		00910_02_T
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1
2015	LC08_L2SP _218075_20	LC08_L2SP _217076_20		LC08_L2SP _217076_20	LC08_L2SP _218075_20	LC08_L2SP _218075_20	LC08_L2SP _218076_20	LC08_L2SP _218076_20	LC08_L2SP _218075_20	LC08_L2SP _217076_20	LC08_L2SP _218075_20	LC08_L2SP _217076_20
	150119_202	150213_202		150418_202	150527_202	150612_202	150714_202	150831_202	150916_202	151011_202	151119_202	151230_202
	00910_02_T	00910_02_T		00909_02_T	00909_02_T	00909_02_T	00908_02_T	00908_02_T	00908_02_T	00908_02_T	00908_02_T	00908_02_T
	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1
2016	LC08_L2SP _217076_20	LC08_L2SP _218076_20	LC08_L2SP _218075_20	LC08_L2SP _217076_20		LC08_L2SP _218075_20		LC08_L2SP _218076_20	LC08_L2SP _217076_20	LC08_L2SP _217076_20		LC08_L2SP _218076_20
	160131_202	160223_202	160310_202	160420_202		160614_202		160801_202	160911_202	161013_202		161223_202
	00907_02_T	00907_02_T	00907_02_T	00907_02_T		00906_02_T		00906_02_T	00906_02_T	00906_02_T		00905_02_T
	1	1	1	1		1		1	1	1		1
2017	LC08_L2SP _217076_20	LC08_L2SP _217076_20			LC08_L2SP _217076_20	LC08_L2SP _218075_20		LC08_L2SP _217076_20	LC08_L2SP _217076_20		LC08_L2SP _217076_20	
	170101_202	170218_202			170525_202	170601_202		170829_202	170914_202		171117_202	
	00905_02_T	00905_02_T			00903_02_T	00903_02_T		00903_02_T	00903_02_T		00902_02_T	
	1	1			1	1		1	1		1	
2018		LC08_L2SP _217076_20	LC08_L2SP _217076_20		LC08_L2SP _217076_20	LC08_L2SP _217076_20	LC08_L2SP _218075_20	LC08_L2SP _218076_20	LC08_L2SP _218075_20	LC08_L2SP _217076_20		LC08_L2SP _217076_20
		180221_202	180325_202		180512_202	180629_202	180706_202	180823_202	180924_202	181003_202		181222_202

		00902_02_T 1	00901_02_T 1		00901_02_T 1	00831_02_T 1	00831_02_T 1	00831_02_T 1	00830_02_T 1	00830_02_T 1		00830_02_T 1	
2019	LC08_L2SP _218076_20 190130_202 00829_02_T 1	LC08_L2SP _217076_20 190224_202 00829_02_T 1		LC08_L2SP _218075_20 190506_202 00829_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 190607_202 00828_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 190725_202 00827_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 190810_202 00827_02_T 1		LC08_L2SP _218075_20 191013_202 00825_02_T 1		LC08_L2SP _218076_20 191216_202 01023_02_T 1		
		LC08_L2SP _218076_20 200218_202 00823_02_T 1	LC08_L2SP _217076_20 200415_202 00822_02_T 1	LC08_L2SP _217076_20 200501_202 00820_02_T 1	LC08_L2SP _217076_20 200602_202 00824_02_T 1	LC08_L2SP _217076_20 200720_202 00911_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 190911_202 00826_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 200913_202 00919_02_T 1					
		LC08_L2SP _217076_20 210128_202 10305_02_T 1	LC08_L2SP _217076_20 210317_202 10328_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 210511_202 10524_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 210628_202 10707_02_T 1	LC08_L2SP _217076_20 210707_202 10713_02_T 1	LC08_L2SP _217076_20 210824_202 10901_02_T 1		LC08_L2SP _218075_20 211002_202 11013_02_T 1 (1)		LC09_L2SP _217076_20 211222_202 30504_02_T 1		
		LC09_L2SP _217076_20 220123_202 30430_02_T 1	LC08_L2SP _218076_20 220223_202 20301_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 220311_202 20321_02_T 1	LC08_L2SP _218076_20 220428_202 20503_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 220530_202 20603_02_T 1	LC08_L2SP _217076_20 220624_202 20706_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 220717_202 20726_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 220802_202 20806_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 220903_202 20913_02_T 1	LC09_L2SP _218076_20 221013_202 30326_02_T 1	LC09_L2SP _217076_20 221209_202 30318_02_T 1	
2022	LC09_L2SP _217076_20 220123_202 30430_02_T 1	LC08_L2SP _218076_20 220223_202 20301_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 220311_202 20321_02_T 1	LC08_L2SP _218076_20 220428_202 20503_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 220530_202 20603_02_T 1	LC08_L2SP _217076_20 220624_202 20706_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 220717_202 20726_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 220802_202 20806_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 220903_202 20913_02_T 1	LC09_L2SP _218076_20 221013_202 30326_02_T 1		LC09_L2SP _217076_20 221209_202 30318_02_T 1	
		LC09_L2SP _217076_20 230118_202 30131_02_T 1	LC09_L2SP _217076_20 230227_202 30308_02_T 1	LC08_L2SP _217076_20 230331_202 30402_02_T 1	LC09_L2SP _218076_20 230424_202 30501_02_T 1	LC08_L2SP _217076_20 230525_202 30601_02_T 1	LC08_L2SP _217076_20 230627_202 30710_02_T 1	LC08_L2SP _217076_20 230713_202 30724_02_T 1	LC09_L2SP _217076_20 230822_202 30824_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 230922_202 30926_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 231024_202 31031_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 231109_202 31117_02_T 1	LC09_L2SP _218076_20 231203_202 31204_02_T 1
		LC08_L2SP _217076_20 230118_202 30131_02_T 1	LC09_L2SP _217076_20 230227_202 30308_02_T 1	LC09_L2SP _217076_20 230331_202 30402_02_T 1	LC08_L2SP _217076_20 230424_202 30501_02_T 1	LC09_L2SP _218076_20 230525_202 30601_02_T 1	LC08_L2SP _217076_20 230627_202 30710_02_T 1	LC08_L2SP _217076_20 230713_202 30724_02_T 1	LC09_L2SP _217076_20 230822_202 30824_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 230922_202 30926_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 231024_202 31031_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 231109_202 31117_02_T 1	LC09_L2SP _218076_20 231203_202 31204_02_T 1
	2023	LC08_L2SP _217076_20 230118_202 30131_02_T 1	LC09_L2SP _217076_20 230227_202 30308_02_T 1	LC09_L2SP _217076_20 230331_202 30402_02_T 1	LC08_L2SP _217076_20 230424_202 30501_02_T 1	LC09_L2SP _218076_20 230525_202 30601_02_T 1	LC08_L2SP _217076_20 230627_202 30710_02_T 1	LC08_L2SP _217076_20 230713_202 30724_02_T 1	LC09_L2SP _217076_20 230822_202 30824_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 230922_202 30926_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 231024_202 31031_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 231109_202 31117_02_T 1	LC09_L2SP _218076_20 231203_202 31204_02_T 1
		LC08_L2SP _217076_20 230118_202 30131_02_T 1	LC09_L2SP _217076_20 230227_202 30308_02_T 1	LC09_L2SP _217076_20 230331_202 30402_02_T 1	LC08_L2SP _217076_20 230424_202 30501_02_T 1	LC09_L2SP _218076_20 230525_202 30601_02_T 1	LC08_L2SP _217076_20 230627_202 30710_02_T 1	LC08_L2SP _217076_20 230713_202 30724_02_T 1	LC09_L2SP _217076_20 230822_202 30824_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 230922_202 30926_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 231024_202 31031_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 231109_202 31117_02_T 1	LC09_L2SP _218076_20 231203_202 31204_02_T 1
		LC08_L2SP _217076_20 230118_202 30131_02_T 1	LC09_L2SP _217076_20 230227_202 30308_02_T 1	LC09_L2SP _217076_20 230331_202 30402_02_T 1	LC08_L2SP _217076_20 230424_202 30501_02_T 1	LC09_L2SP _218076_20 230525_202 30601_02_T 1	LC08_L2SP _217076_20 230627_202 30710_02_T 1	LC08_L2SP _217076_20 230713_202 30724_02_T 1	LC09_L2SP _217076_20 230822_202 30824_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 230922_202 30926_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 231024_202 31031_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 231109_202 31117_02_T 1	LC09_L2SP _218076_20 231203_202 31204_02_T 1
		LC08_L2SP _217076_20 230118_202 30131_02_T 1	LC09_L2SP _217076_20 230227_202 30308_02_T 1	LC09_L2SP _217076_20 230331_202 30402_02_T 1	LC08_L2SP _217076_20 230424_202 30501_02_T 1	LC09_L2SP _218076_20 230525_202 30601_02_T 1	LC08_L2SP _217076_20 230627_202 30710_02_T 1	LC08_L2SP _217076_20 230713_202 30724_02_T 1	LC09_L2SP _217076_20 230822_202 30824_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 230922_202 30926_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 231024_202 31031_02_T 1	LC08_L2SP _218075_20 231109_202 31117_02_T 1	LC09_L2SP _218076_20 231203_202 31204_02_T 1

2024	LC09_L2SP	LC09_L2SP	LC09_L2SP	LC09_L2SP	LC08_L2SP	LC08_L2SP	LC08_L2SP	LC08_L2SP	LC08_L2SP	LC08_L2SP	LC08_L2SP	LC08_L2SP
	_217076_20	_218075_20	_217076_20	_218075_20	_217076_20	_218076_20	_218075_20	_218076_20	_218075_20	_218075_20	_218075_20	_217076_20
	240129_202	240205_202	240317_202	240425_202	240512_202	240620_202	240722_202	240823_202	240924_202	241026_202	241127_202	241206_202
	40130_02_T	40208_02_T	40318_02_T	40502_02_T	40520_02_T	40706_02_T	40731_02_T	40830_02_T	40928_02_T	41030_02_T	41202_02_T	41210_02_T
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Anexo 2 - Códigos utilizados

a) Código a - Geração do índice NDVI

```
import arcpy
from arcpy.sa import *
# Configurar o ambiente
arcpy.env.workspace =
    r"D:\Mestrado\Dados\SR\Imagens"
arcpy.env.overwriteOutput
    = True
# Diretório de saída
output_folder =
    r"D:\Mestrado\Dados\Produtos\NDVI\2014"
# Lista de rasters no
    diretório
raster_list =
    arcpy.ListRasters("*", "TIF")
# Loop para calcular NDVI
for raster in
    raster_list:
    #
        Verifica se é Landsat 8 - procura pelas bandas Red e NIR
    if "_B4" in
        raster: # Banda 4 (Red)
            red_band = Raster(raster)
        #
            Procurar a banda correspondente (_B5) no mesmo grupo de arquivos
        nir_band_name =
            raster.replace("_B4", "_B5")
        nir_band =
            Raster(nir_band_name)
# Calcular NDVI
    ndvi = (nir_band -
        red_band) / (nir_band + red_band)
# Gerar nome de saída
```

```

output_name
= f'{output_folder}\\NDVI_{raster.split('_')[3]}.tif' # Usa a
data como parte do nome
ndvi.save(output_name)
print(f'NDVI
calculado e salvo: {output_name}')
print("Processo
concluído!")

```

b) Código b - Aplicação de máscara de recorte de área

Aplicação de máscara de recorte de área

```

import arcpy
# Configurar o ambiente
arcpy.env.workspace = r"D:\Mestrado\Dados\Produtos\NDVI\2014" #
Local das imagens NDVI
arcpy.env.overwriteOutput = True
# Diretório de saída para os arquivos recortados
output_folder = r"D:\Mestrado\Dados\Produtos\NDVI\Clip"
# Caminho para a feature class na GDB
clip_feature =
r"D:\Mestrado\ProjetoAPRO\Mestrado_2025\Mestrado_2025.gdb\Bacia_Brandao"
# Lista de rasters no diretório
ndvi_rasters = arcpy.ListRasters("*", "TIF")
# Loop para aplicar o Clip em cada raster
for raster in ndvi_rasters:
    # Nome do arquivo de saída
    output_raster = f'{output_folder}\\Clip_{raster}'
    # Aplicar o Clip
    arcpy.management.Clip(
        in_raster=raster,
        rectangle="", # Não é necessário quando usa feature mask
        out_raster=output_raster,
        in_template_dataset=clip_feature, # Feature class usada como
máscara

```

```

        clipping_geometry="ClippingGeometry", # Usa o limite exato da
geometria
        maintain_clipping_extent="NO_MAINTAIN_EXTENT"
    )
    print(f"Clip concluído: {output_raster}")
    print("Processo de clip em lote concluído!")

```

c) Código c - Cálculo do NDBI

```

import arcpy
from arcpy.sa import *
# Configurar o ambiente
arcpy.env.workspace = r"D:\Mestrado\Dados\SR\Imagens"
arcpy.env.overwriteOutput = True
# Diretórios de saída
ndbi_folder = r"D:\Mestrado\Dados\Produtos\NDBI\2014"
clip_folder = r"D:\Mestrado\Dados\Produtos\NDBI\2014\Clip"
# Caminho para a feature class usada no recorte
clip_feature =
r"D:\Mestrado\ProjetoAPRO\Mestrado_2025\Mestrado_2025.gdb\Bacia_Brandao"
# Lista de rasters no diretório
raster_list = arcpy.ListRasters("*", "TIF")
# Loop para calcular NDBI e aplicar o clip
for raster in raster_list:
    if "_B6" in raster: # SWIR
        swir_band = Raster(raster)
        nir_band_name = raster.replace("_B6", "_B5") # NIR
        nir_band = Raster(nir_band_name)
        # Calcular NDBI
        ndbi = (swir_band - nir_band) / (swir_band + nir_band)
        # Salvar NDBI
        ndbi_output = f"{ndbi_folder}\\NDBI_{raster.split('_')[3]}.tif"
        ndbi.save(ndbi_output)
        print(f"NDBI calculado: {ndbi_output}")
        # Aplicar o clip no NDBI

```

```

clipped_ndbi = f'{clip_folder}\\Clip_NDBI_{raster.split('_')[3]}.tif'
arcpy.management.Clip(
    in_raster=ndbi_output,
    rectangle="",
    out_raster=clipped_ndbi,
    in_template_dataset=clip_feature,
    clipping_geometry="ClippingGeometry",
    maintain_clipping_extent="NO_MAINTAIN_EXTENT"
)
print(f'Clip NDBI concluído: {clipped_ndbi}')
print("Cálculo e clip de NDBI concluídos!")

```

d) Código d - Cálculo do NDWI

```

import arcpy
from arcpy.sa import *
# Configurar o ambiente
arcpy.env.workspace = r"D:\Mestrado\Dados\SR\Imagens"
arcpy.env.overwriteOutput = True
# Diretórios de saída
ndwi_folder = r"D:\Mestrado\Dados\Produtos\NDWI\2014"
clip_folder = r"D:\Mestrado\Dados\Produtos\NDWI\2014\Clip"
# Caminho para a feature class usada no recorte
clip_feature =
r"D:\Mestrado\ProjetoAPRO\Mestrado_2025\Mestrado_2025.gdb\Bacia_Brandao"
# Lista de rasters no diretório
raster_list = arcpy.ListRasters("*", "TIF")
# Loop para calcular NDWI e aplicar o clip
for raster in raster_list:
    if "_B3" in raster: # Green
        green_band = Raster(raster)
        nir_band_name = raster.replace("_B3", "_B5") # NIR
        nir_band = Raster(nir_band_name)
        # Calcular NDWI
        ndwi = (green_band - nir_band) / (green_band + nir_band)

```

```

# Salvar NDWI
ndwi_output = f"{ndwi_folder}\\NDWI_{raster.split('_')[3]}.tif"
ndwi.save(ndwi_output)
print(f"NDWI calculado: {ndwi_output}")

# Aplicar o clip no NDWI
clipped_ndwi = f"{clip_folder}\\Clip_NDWI_{raster.split('_')[3]}.tif"
arcpy.management.Clip(
    in_raster=ndwi_output,
    rectangle="",
    out_raster=clipped_ndwi,
    in_template_dataset=clip_feature,
    clipping_geometry="ClippingGeometry",
    maintain_clipping_extent="NO_MAINTAIN_EXTENT"
)
print(f"Clip NDWI concluído: {clipped_ndwi}")
print("Cálculo e clip de NDWI concluídos!")

```

e) Código e - Cálculo de média do NDVI

```

import arcpy
from arcpy.sa import *
# Configurar o ambiente
arcpy.env.workspace = r"D:\Mestrado\Dados\Produtos\NDVI\Clip"
arcpy.env.overwriteOutput = True
# Diretório de saída para o raster médio
output_raster = r"D:\Mestrado\Dados\Produtos\NDVI\Média_Clip_NDVI.tif"
# Lista de rasters Clip_NDVI
ndvi_rasters = arcpy.ListRasters("Clip_NDVI*", "TIF")
# Verifica se há rasters suficientes
if len(ndvi_rasters) > 0:
    # Calcular a média usando Cell Statistics
    mean_ndvi = CellStatistics(ndvi_rasters, "MEAN", "DATA")
    # Salvar o raster médio
    mean_ndvi.save(output_raster)

```

```

    print(f"Média de Clip_NDVI salva em: {output_raster}")
else:
    print("Nenhum arquivo Clip_NDVI encontrado para calcular a média.")

```

f) Código f - Cálculo de média do NDBI

```

import arcpy
from arcpy.sa import *
# Configurar o ambiente
arcpy.env.workspace = r"D:\Mestrado\Dados\Produtos\NDBI\2014\Clip"
arcpy.env.overwriteOutput = True
# Diretório de saída para o raster médio
output_raster =
r"D:\Mestrado\Dados\Produtos\NDBI\2014\Média_Clip_NDBI.tif"
# Lista de rasters Clip_NDBI
ndbi_rasters = arcpy.ListRasters("Clip_NDBI*", "TIF")
# Verifica se há rasters suficientes
if len(ndbi_rasters) > 0:
    # Calcular a média usando Cell Statistics
    mean_ndbi = CellStatistics(ndbi_rasters, "MEAN", "DATA")
    # Salvar o raster médio
    mean_ndbi.save(output_raster)
    print(f"Média de Clip_NDBI salva em: {output_raster}")
else:
    print("Nenhum arquivo Clip_NDBI encontrado para calcular a média.")

```

g) Código g - Cálculo de média do NDWI

```

import arcpy
from arcpy.sa import *
# Configurar o ambiente
arcpy.env.workspace = r"D:\Mestrado\Dados\Produtos\NDWI\2014\Clip"
arcpy.env.overwriteOutput = True
# Diretório de saída para o raster médio
output_raster =
r"D:\Mestrado\Dados\Produtos\NDWI\2014\Média_Clip_NDWI.tif"

```

```

# Lista de rasters Clip_NDWI
ndwi_rasters = arcpy.ListRasters("Clip_NDWI*", "TIF")

# Verifica se há rasters suficientes
if len(ndwi_rasters) > 0:
    # Calcular a média usando Cell Statistics
    mean_ndwi = CellStatistics(ndwi_rasters, "MEAN", "DATA")
    # Salvar o raster médio
    mean_ndwi.save(output_raster)
    print(f"Média de Clip_NDWI salva em: {output_raster}")
else:
    print("Nenhum arquivo Clip_NDWI encontrado para calcular a média.")

```

h) Código h - Cálculo de média anuais dos índices NDVI, NDWI e NDBI

```

import os
import arcpy
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
import seaborn as sns # Para gráficos avançados como KDE e heatmap
import numpy as np # Para gráficos de radar
from numpy.polynomial.polynomial import Polynomial # Para curvas de
tendência

# Configurar o diretório principal e índices
base_dir = r"D:\Mestrado\Dados\Produtos"
indices = ["NDVI", "NDWI", "NDBI"]
anos = list(range(2014, 2025))

# Inicializar estrutura para armazenar dados
dados_indices = {indice: [] for indice in indices}

# Processar cada índice
for indice in indices:
    for ano in anos:
        # Caminho para o raster médio do ano e índice
        raster_path = os.path.join(base_dir, indice, str(ano),
f"Média_Clip_{indice}.tif")

```

```

if os.path.exists(raster_path):
    # Extrair a média do raster usando ArcPy
    mean = arcpy.GetRasterProperties_management(raster_path,
"MEAN").getOutput(0)
    mean = float(mean.replace(",", ".")) # Substituir vírgula por ponto
    dados_indices[indice].append({"Ano": ano, "Média": mean})
else:
    print(f"Arquivo não encontrado: {raster_path}")
# Converter dados para DataFrame
dfs = {}
for indice, dados in dados_indices.items():
    dfs[indice] = pd.DataFrame(dados).sort_values(by="Ano")
# Gerar gráficos
for indice, df in dfs.items():
    # Linha Temporal com Curva de Tendência
    plt.figure(figsize=(10, 6))
    plt.plot(df["Ano"], df["Média"], marker='o', label=f'Média do {indice}')
    # Ajuste da curva de tendência (polinomial de grau 2)
    p = Polynomial.fit(df["Ano"], df["Média"], deg=2)
    anos_tendencia = np.linspace(df["Ano"].min(), df["Ano"].max(), 100)
    plt.plot(anos_tendencia, p(anos_tendencia), linestyle='--', color='red',
label='Tendência')
    plt.title(f'Evolução da Média do {indice} (2014-2024)')
    plt.xlabel('Ano')
    plt.ylabel(f'Média do {indice}')
    plt.grid(True)
    plt.legend()
    plt.savefig(os.path.join(base_dir, f'Linha_Temporal_{indice}.png'))
    plt.show()

# Histograma com KDE
valores = df["Média"].values
plt.figure(figsize=(10, 6))
sns.histplot(valores, bins=10, kde=True, color='blue', label=indice)

```

```

plt.title(f'Histograma com Densidade de Frequência (KDE) do {indice}
(2014-2024)')
plt.xlabel(f'{indice}')
plt.ylabel('Frequência')
plt.grid(axis='y')
plt.legend()
plt.savefig(os.path.join(base_dir, f'Histograma_{indice}_KDE.png'))
plt.show()

# Boxplot
plt.figure(figsize=(10, 6))
sns.boxplot(x=df["Ano"], y=df["Média"])
plt.title(f'Boxplot das Médias do {indice} por Ano (2014-2024)')
plt.xlabel("Ano")
plt.ylabel(f'Média do {indice}')
plt.grid(True)
plt.savefig(os.path.join(base_dir, f'Boxplot_{indice}.png'))
plt.show()

# Gráficos de Dispersão com Curva de Tendência
# NDVI vs. NDBI
if "NDVI" in dfs and "NDBI" in dfs:
    plt.figure(figsize=(8, 6))
    plt.scatter(dfs["NDVI"]["Média"], dfs["NDBI"]["Média"], color="green",
alpha=0.7)

    # Ajuste da curva de tendência linear
    coef = np.polyfit(dfs["NDVI"]["Média"], dfs["NDBI"]["Média"], 1)
    tendencia = np.poly1d(coef)
    x_vals = np.linspace(min(dfs["NDVI"]["Média"]),
max(dfs["NDVI"]["Média"]), 100)
    plt.plot(x_vals, tendencia(x_vals), linestyle='--', color='red',
label='Tendência')

    plt.title("Relação entre NDVI e NDBI (2014-2024)")
    plt.xlabel("Média do NDVI")
    plt.ylabel("Média do NDBI")
    plt.grid(True)

```

```

plt.legend()
plt.savefig(os.path.join(base_dir, "Dispersao_NDVI_vs_NDBI.png"))
plt.show()
# NDWI vs. NDVI
if "NDWI" in dfs and "NDVI" in dfs:
    plt.figure(figsize=(8, 6))
    plt.scatter(dfs["NDWI"]["Média"], dfs["NDVI"]["Média"], color="blue",
alpha=0.7)
    # Ajuste da curva de tendência linear
    coef = np.polyfit(dfs["NDWI"]["Média"], dfs["NDVI"]["Média"], 1)
    tendencia = np.poly1d(coef)
    x_vals = np.linspace(min(dfs["NDWI"]["Média"]),
max(dfs["NDWI"]["Média"]), 100)
    plt.plot(x_vals, tendencia(x_vals), linestyle='--', color='red',
label='Tendência')
    plt.title("Relação entre NDWI e NDVI (2014-2024)")
    plt.xlabel("Média do NDWI")
    plt.ylabel("Média do NDVI")
    plt.grid(True)
    plt.legend()
    plt.savefig(os.path.join(base_dir, "Dispersao_NDWI_vs_NDVI.png"))
    plt.show()
# Radar Chart
for ano_especifico in anos:
    try:
        valores = [dfs[indice][dfs[indice]["Ano"]
ano_especifico]["Média"].values[0] for indice in indices]
        angles = np.linspace(0, 2 * np.pi, len(indices), endpoint=False).tolist()
        valores += valores[:1]
        angles += angles[:1]
        fig, ax = plt.subplots(figsize=(8, 6), subplot_kw=dict(polar=True))
        ax.fill(angles, valores, color='blue', alpha=0.25)
        ax.plot(angles, valores, color='blue', linewidth=2)
        ax.set_xticks(angles[:-1])

```

```

ax.set_xticklabels(indices)
ax.set_title(f"Comparação dos Índices em {ano_especifico}")
plt.savefig(os.path.join(base_dir, f"Radar_{ano_especifico}.png"))
plt.show()
except IndexError:
    print(f"Dados insuficientes para o ano {ano_especifico}.")

```

i) *Código i - Cálculo de média mensal dos índices NDVI, NDWI e NDBI*

```

import os
import arcpy
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
import seaborn as sns
import numpy as np
from numpy.polynomial.polynomial import Polynomial
# Configurar o diretório principal e índices
base_dir = r"D:\Mestrado\Dados\Produtos"
analise_mensal_dir = r"D:\Mestrado\Dados\Produtos\Análise mensal"
indices = ["NDVI", "NDWI", "NDBI"]
anos = list(range(2014, 2025))
meses = ["01", "02", "03", "04", "05", "06", "07", "08", "09", "10", "11", "12"]
# Inicializar estrutura para armazenar dados
dados_mensais = {indice: [] for indice in indices}
# Processar cada índice
for indice in indices:
    for ano in anos:
        for mes in meses:
            raster_dir = os.path.join(base_dir, indice, str(ano), "Clip")
            if not os.path.exists(raster_dir):
                continue
            # Procurar arquivos que correspondem ao ano e mês
            arquivos = [f for f in os.listdir(raster_dir) if
f.startswith(f"Clip_{indice}_{ano}{mes}") and f.endswith(".tif")]
            if arquivos:

```

```

        # Selecionar o primeiro arquivo encontrado (ou implementar
lógica personalizada)
        raster_path = os.path.join(raster_dir, arquivos[0])
        try:
            mean = arcpy.GetRasterProperties_management(raster_path,
"MEAN").getOutput(0)
            mean = float(mean.replace(",", ".")) # Substituir vírgula por
ponto

            dados_mensais[indice].append({"Ano": ano, "Mes": mes,
"Média": mean})

        except Exception as e:
            print(f"Erro ao processar {raster_path}: {e}")
        else:
            print(f"Arquivo não encontrado para {indice} em {ano}-{mes}.")
# Converter dados para DataFrame
dfs_mensais = {}
for indice, dados in dados_mensais.items():
    if dados: # Verifica se há dados para o índice
        dfs_mensais[indice] = pd.DataFrame(dados).sort_values(by=["Ano",
"Mes"])
    else:
        print(f"Nenhum dado encontrado para o índice {indice}.")
        continue
# Gerar gráficos mensais
for indice, df in dfs_mensais.items():
    if df.empty:
        print(f"Nenhum dado disponível para gráficos do índice {indice}.")
        continue
    # Linha Temporal Mensal com Curva de Tendência
    plt.figure(figsize=(14, 8))
    df["Data"] = pd.to_datetime(df["Ano"].astype(str) + "-" +
df["Mes"].astype(str), format='%Y-%m')
    plt.plot(df["Data"], df["Média"], marker='o', label=f'Média Mensal do
{indice}')

```

```

# Ajuste da curva de tendência (polinomial de grau 2)
if len(df) > 2: # Curva de tendência exige pelo menos 3 pontos
    p = Polynomial.fit(range(len(df)), df["Média"], deg=2)
    meses_tendencia = np.linspace(0, len(df) - 1, 100)
    plt.plot(df["Data"].iloc[meses_tendencia.astype(int)],
p(meses_tendencia), linestyle='--', color='red', label='Tendência')
    plt.title(f'Evolução Mensal da Média do {indice} (2014-2024)')
    plt.xlabel('Mês/Ano')
    plt.ylabel(f'Média do {indice}')
    plt.grid(True)
    plt.legend()
    plt.savefig(os.path.join(analise_mensal_dir,
f"Linha_Temporal_Mensal_{indice}.png"))
    plt.show()
# Histograma Mensal com KDE
plt.figure(figsize=(10, 6))
sns.histplot(df["Média"], bins=12, kde=True, color='blue', label=indice)
plt.title(f'Histograma Mensal com Densidade de Frequência (KDE) do
{indice} (2014-2024)')
plt.xlabel(f'{indice}')
plt.ylabel('Frequência')
plt.grid(axis='y')
plt.legend()
plt.savefig(os.path.join(analise_mensal_dir,
f"Histograma_Mensal_{indice}_KDE.png"))
plt.show()
# Boxplot Mensal
plt.figure(figsize=(10, 6))
sns.boxplot(x=df["Mes"], y=df["Média"], hue=df["Ano"].astype(str))
plt.title(f'Boxplot Mensal das Médias do {indice} (2014-2024)')
plt.xlabel("Mês")
plt.ylabel(f'Média do {indice}')
plt.grid(True)

```

```

plt.savefig(os.path.join(analise_mensal_dir,
f"Boxplot_Mensal_{indice}.png"))
plt.show()

```

j) Código j - Código utilizado para realizar a composição de bandas

```

import os
import arcpy
import logging
# Configurar logs
logging.basicConfig(
    level=logging.INFO,
    format="%(asctime)s - %(levelname)s - %(message)s",
    handlers=[logging.StreamHandler()]
)
# Configurar ambiente
arcpy.env.overwriteOutput = True
# Diretórios
base_dir = r"D:\Mestrado\Dados\SR\Imagens 2014"
output_dir = r"D:\Mestrado\Dados\Produtos\composição\2014"
os.makedirs(output_dir, exist_ok=True)
# Bandas para composição (red, green, blue)
bandas = {
    "red": "B4",
    "green": "B3",
    "blue": "B2"
}
# Função para encontrar arquivos de bandas em um dataset
def encontrar_bandas(dataset_dir, arquivo_base, bandas):
    arquivos_bandas = {}
    for banda_nome, banda_codigo in bandas.items():
        banda_arquivo = arquivo_base.replace("B1", banda_codigo)
        banda_caminho = os.path.join(dataset_dir, banda_arquivo)
        if os.path.exists(banda_caminho):
            arquivos_bandas[banda_nome] = banda_caminho

```

```

    return arquivos_bandas

# Função para extrair ano e mês do nome do dataset
def extrair_ano_mes(nome_dataset):
    partes = nome_dataset.split("_")
    for parte in partes:
        if parte.isdigit() and len(parte) == 8: # Procurar por formato
AAAAMMDD

        return parte[:4], parte[4:6] # Retornar ano e mês
    return "Desconhecido", "Desconhecido"

# Função para realizar a composição das bandas
def composição_bandas(arquivos_bandas, output_path):
    try:
        if len(arquivos_bandas) == 3:
            logging.info(f"Bandas utilizadas para composição:
Red={arquivos_bandas['red']}, Green={arquivos_bandas['green']},
Blue={arquivos_bandas['blue']}")
            arcpy.CompositeBands_management(
                [arquivos_bandas["red"], arquivos_bandas["green"],
arquivos_bandas["blue"]],
                output_path
            )
            logging.info(f"composição concluída e salva em: {output_path}")
        else:
            logging.warning(f"Bandas incompletas para composição:
{arquivos_bandas}")
    except Exception as e:
        logging.error(f"Erro ao realizar composição das bandas: {e}")

# Processar arquivos individuais
for arquivo in os.listdir(base_dir):
    if arquivo.endswith("B1.TIF"):
        logging.info(f"Processando arquivo base: {arquivo}")
        # Encontrar bandas no diretório base
        arquivos_bandas = encontrar_bandas(base_dir, arquivo, bandas)

```

```
# Extrair ano e mês
ano, mes = extrair_ano_mes(arquivo)
# Caminho de saída
output_path = os.path.join(output_dir, f"composição_{ano}_{mes}.tif")
# Realizar composição
composição_bandas(arquivos_bandas, output_path)
```