

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO - UENF
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CLIMA E ENERGIA - PPGC&E

MARIANE DE MATOS PEREIRA HIPÓLITO

**DEGRADAÇÃO AMBIENTAL E MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO ESTADO DO RIO
DE JANEIRO**

MACAÉ-RJ, 2026

MARIANE DE MATOS PEREIRA HIPÓLITO

**DEGRADAÇÃO AMBIENTAL E MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO ESTADO DO RIO
DE JANEIRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Clima e Energia, do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Clima e Energia.

Orientadora: Profa. Dra. Eliane Barbosa Santos

MACAÉ-RJ, 2026

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

H667

Hipolito, Mariane de Matos Pereira.

Degradação Ambiental e Mudanças Climáticas no Estado do Rio de Janeiro / Mariane de Matos Pereira Hipolito. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2026.

190 f. : il.

Bibliografia: 91 - 100.

Dissertação (Mestrado em Clima e Energia) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2026.

Orientadora: Eliane Barbosa Santos.

1. Mata Atlântica. 2. gestão territorial. 3. uso e cobertura da terra. 4. tendência climática. 5. resiliência ecológica. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 123

DEGRADAÇÃO AMBIENTAL E MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

MARIANE DE MATOS PEREIRA HIPÓLITO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Clima e Energia, do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Clima e Energia.

Aprovado em 11/03/2026

Comissão Examinadora:

Profa. Dra. Eliane Barbosa Santos - UENF (Orientadora)

Prof. Dr. Antonio Carlos da Silva Oscar Júnior - UERJ

Prof. Dr. Jório Bezerra Cabral Júnior - UFAL

Prof. Dr. Wanderson Luiz Silva - UFRJ

MACAÉ-RJ, 2026

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação é o resultado de uma jornada que exigiu fé, dedicação e suporte. Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder força e perseverança em todos os momentos. O amor, o apoio incondicional e o incentivo constante do meu esposo, Gustavo Hipólito da Silva, bem como dos meus amigos que acreditaram nesta caminhada, foram fundamentais e especiais.

Dedico uma gratidão especial à minha orientadora, Professora Dra. Eliane Barbosa Santos, pela paciência, pelos ensinamentos valiosos e por guiar com excelência o rigor científico desta pesquisa. Reconheço a colaboração fundamental do pesquisador Gildo Rafael de Almeida Santana, cujo suporte técnico na elaboração dos mapas foi determinante para a análise espacial e a qualidade final deste trabalho.

Agradeço à Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), ao Programa de Pós-Graduação em Clima e Energia (PPGC&E) e a todo o corpo docente pela oportunidade de formação. Em especial, agradeço à UENF pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa de estudos, que possibilitou a dedicação integral à pesquisa.

Por fim, agradeço ao INMET, ao MapBiomass e aos órgãos ambientais (INEA e ICMBio) pela disponibilização dos dados e bases cartográficas, fundamentais para o êxito deste estudo.

RESUMO

A degradação ambiental do bioma Mata Atlântica e a intensificação das mudanças climáticas eleva a vulnerabilidade socioambiental no Estado do Rio de Janeiro. O presente estudo analisou a dinâmica do uso e cobertura da terra (1985–2024) e a ocorrência de eventos climáticos extremos (1972–2025). Para tanto, foram analisados dados do MapBiomas (Coleção 10), cuja resolução espacial de 30 metros possibilitou identificar padrões de persistência, conversão e pressão antrópica sobre a vegetação nativa; o Índice de Resiliência Territorial (IRT), indicador que relaciona áreas em regeneração às áreas de supressão, permitindo avaliar o balanço entre processos de recuperação e desmatamento; e dados meteorológicos diários de temperatura máxima, mínima e precipitação disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), referentes ao período de 1972 a 2025 de seis estações convencionais localizadas no Estado do Rio de Janeiro. Os dados foram analisados por meio de testes não paramétricos de Mann-Kendall, Sen e Pettitt. A partir dos dados do MapBiomas, os resultados indicam que a expansão urbana e a consolidação da agropecuária impulsionaram a fragmentação da paisagem. Embora o IRT de 16,68 indique um superávit quantitativo de área regenerada em 2023, a supressão incide sobre florestas nativas maduras, enquanto a recuperação restringe-se à vegetação secundária de menor funcionalidade ecológica. As pressões antrópicas transpassam limites de Unidades de Conservação e APPs, evidenciando falhas no controle territorial. No âmbito climático, as tendências de aquecimento foram sistemáticas e mais expressivas que as de precipitação. Quatro das seis estações apresentaram elevação nas temperaturas mínimas de verão e nas máximas de primavera, com magnitudes decadais de até 0,85 °C e 0,73 °C, respectivamente. As rupturas térmicas concentraram-se entre 1992 e 2011, consolidando um regime térmico mais severo. Como produto tecnológico, desenvolveu-se um guia metodológico para processamento de dados do MapBiomas, visando instrumentalizar os municípios para o monitoramento autônomo, o planejamento territorial e a eficiência fiscal.

Palavras-chave: Mata Atlântica; gestão territorial; uso e cobertura da terra; tendência climática; resiliência ecológica.

ABSTRACT

Environmental degradation in the Atlantic Forest biome and the climate change intensification increase socio-environmental vulnerability in the State of Rio de Janeiro. This study analyzed land use and land cover (LULC) dynamics (1985–2024) and the occurrence of extreme climate events (1972–2025). To this end, the study examined MapBiomass data (Collection 10), whose 30-meter spatial resolution enabled the identification of patterns of persistence, conversion, and anthropogenic pressure on native vegetation; the Territorial Resilience Index (IRT), an indicator relating regenerating areas to suppressed areas to evaluate the balance between recovery and deforestation; and daily meteorological data (maximum and minimum temperature, and precipitation) provided by the National Institute of Meteorology (INMET), covering the period from 1972 to 2025 across six conventional stations in the state. Data were analyzed using non-parametric Mann-Kendall, Sen, and Pettitt tests. MapBiomass results indicate that urban expansion and agricultural consolidation have driven landscape fragmentation. Although an IRT of 16.68 suggests a quantitative surplus of regenerated area in 2023, suppression persists in mature native forests, while recovery is restricted to secondary vegetation with lower ecological functionality. Anthropogenic pressures transcend the boundaries of Protected Areas (UCs) and Permanent Preservation Areas (APPs), evidencing territorial control failures. Regarding the climate, warming trends were systematic and more pronounced than precipitation trends. Four out of six stations showed significant increases in summer minimum and spring maximum temperatures, with decadal magnitudes reaching 0.85 °C and 0.73 °C, respectively. Thermal ruptures concentrated between 1992 and 2011, establishing a more severe thermal regime. As a technological product, a methodological guide for processing MapBiomass data was developed to equip municipalities with tools for autonomous monitoring, territorial planning, and fiscal efficiency.

Keywords: Atlantic Forest; territorial management; land use and land cover; climate trend; ecological resilience.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de hipsometria e hidrografia do Estado do Rio de Janeiro.	39
Figura 2. Classificação climática de Köppen no Estado do Rio de Janeiro.	40
Figura 3. Fluxograma metodológico do processamento de dados espaciais e análise da dinâmica do uso da terra.	45
Figura 4. Regiões geográficas imediatas e intermediárias do Estado do Rio de Janeiro e distribuição das estações meteorológicas utilizadas (INMET).	48
Figura 5. Fluxograma do tratamento de dados climáticos e aplicação dos testes estatísticos de tendência e ruptura.	53
Figura 6. Cobertura e uso da terra no Estado do Rio de Janeiro (1985-2024).	55
Figura 7. Evolução temporal das principais classes de uso e cobertura da terra no Estado do Rio de Janeiro (1985–2024).	56
Figura 8. Transição de uso e cobertura da terra no Estado do Rio de Janeiro (1985-2023).	59
Figura 9. Desmatamento e vegetação secundária no Estado do Rio de Janeiro (2023).	61
Figura 10. Sobreposição entre a dinâmica da cobertura vegetal e áreas de proteção legal no Estado do Rio de Janeiro.	64
Figura 11. Séries temporais da precipitação diária (1972–2025) das seis estações meteorológicas selecionadas do Estado do Rio de Janeiro.	68
Figura 12. Séries temporais da temperatura máxima diária (1972–2025) das seis estações meteorológicas selecionadas do Estado do Rio de Janeiro.	69
Figura 13. Séries temporais da temperatura mínima diária (1972–2025) das seis estações meteorológicas selecionadas do Estado do Rio de Janeiro.	70
Figura 14. Máximos anuais da precipitação diária, por estação do ano, registrados nas seis estações meteorológicas selecionadas do Estado do Rio de Janeiro.	71
Figura 15. Máximos anuais da temperatura máxima diária, por estação do ano, registrados nas seis estações meteorológicas selecionadas do Estado do Rio De Janeiro.	72
Figura 16. Mínimos anuais da temperatura mínima diária, por estação do ano, registrados nas seis estações meteorológicas selecionadas do Estado do Rio de Janeiro.	74

Figura 17. Distribuição sazonal dos extremos anuais de precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima diária para as estações meteorológicas selecionadas.	75
Figura 18. Série temporal dos valores máximos anuais de precipitação, por estação do ano, das seis estações meteorológicas selecionadas do Estado do Rio de Janeiro.	77
Figura 19. Série temporal dos valores máximos anuais de temperatura máxima, por estação do ano, das seis estações meteorológicas selecionadas do Estado do Rio de Janeiro.....	79
Figura 20. Série temporal dos valores mínimos anuais de temperatura mínima, por estação do ano, das seis estações meteorológicas selecionadas do Estado do Rio de Janeiro.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estações meteorológicas selecionadas e suas principais informações. ...	47
Tabela 2. Quantificação das áreas de supressão e recuperação da vegetação nativa no Estado do Rio de Janeiro (2023).....	62
Tabela 3. Resumo das tendências climáticas anuais por variável e estação do ano, abrangendo os extremos: máximos anuais de precipitação e temperatura máxima, e mínimos anuais de temperatura mínima.	83
Tabela 4. Resumo das tendências climáticas anuais por estação meteorológica e estação do ano, abrangendo os extremos: máximos anuais de precipitação e temperatura máxima, e mínimos anuais de temperatura mínima.....	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASAS - Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul

APA – Áreas de Proteção Ambiental

APP – Áreas de Preservação Permanente

CCM - Complexos Convectivos de Mesoescala

CEPERJ - Fundação Centro Estadual de Estatísticas, Pesquisas e Formação de Servidores Públicos do Rio de Janeiro

CEPED - Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres

CPTEC/INPE - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

DOL - Distúrbios Ondulatórios de Leste

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICMS – Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

IFCA - Índice Final de Conservação Ambiental

INEA – Instituto Estadual do Ambiente

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change)

IRT – Índice de Resiliência Territorial

MMA – Ministério do Meio Ambiente

PEDES - Plano Estratégico de Desenvolvimento Econômico e Social

PIB – Produto Interno Bruto

PMMA – Plano Municipal de Conservação e Recuperação da Mata Atlântica

PSA - Pagamento por Serviços Ambientais

RCP – *Representative Concentration Pathways* (Trajetórias de Concentração Representativas).

RGI – Região Geográfica Imediata

RPPN – Reserva Particular do Patrimônio Natural

SbN - Soluções Baseadas na Natureza

SIG - Sistemas de Informação Geográfica

SIRGAS – Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas

SUPGECOS – Superintendência de Gestão Ecosistêmica

UC – Unidade de Conservação

UERJ – Universidade do Estado do Rio de Janeiro

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	16
1.2	Estrutura do Trabalho	16
2.	REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1	O Bioma Mata Atlântica no Cenário de Degradação Ambiental	18
2.1.1	Importância Ecológica e Serviços Ecossistêmicos	19
2.1.2	Histórico de Ocupação e Degradação Ambiental	20
2.2	Impactos das Mudanças Climáticas na Mata Atlântica	22
2.3	Climatologia e Eventos Extremos no Estado do Rio de Janeiro	25
2.4	Políticas Públicas e Governança Ambiental na Mata Atlântica: Avanços e Desafios	28
2.5	Conceitos Fundamentais e Definições de Termos	30
3.	METODOLOGIA	38
3.1	Caracterização da Área de Estudo	38
3.2	Dinâmica do Uso da Terra e Processos de Ocupação Territorial	42
3.3	Dados Meteorológicos Observados	46
3.4	Análise Descritiva e de Tendência das Variáveis Climáticas	49
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1	Dinâmica do Uso da Terra e Processos de Ocupação Territorial	54
4.2	Análise Descritiva e de Tendência das Variáveis Climáticas	66
5.	PRODUTO TECNOLÓGICO	87
6.	CONCLUSÃO	89
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
	APÊNDICE A – RESULTADOS DAS TENDÊNCIAS CLIMÁTICAS	101
	APÊNDICE B – GUIA METODOLÓGICO - PROCESSAMENTO DE DADOS DO MAPBIOMAS: DO DOWNLOAD À ANÁLISE ESPACIAL	107

1. INTRODUÇÃO

A degradação ambiental e as mudanças climáticas representam desafios globais, marcados pelo aumento contínuo das temperaturas médias do planeta e pela alteração dos processos naturais que sustentam o equilíbrio dos ecossistemas. De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021), a elevação da temperatura média global, impulsionada pelas emissões de gases de efeito estufa, tem aumentado a frequência e a intensidade dos eventos extremos, ocasionando desequilíbrios nos ciclos hidrológicos. Essas alterações globais manifestam impactos severos em regiões sensíveis, como o Estado do Rio de Janeiro.

A vulnerabilidade, definida pela interação entre fatores naturais e fragilidades da ocupação humana (Girão; Rabelo; Zanella, 2018), intensifica-se no contexto fluminense devido à localização costeira e à topografia que concentra núcleos urbanos entre o mar e as montanhas. Cerca de 18% da área da Região Metropolitana do Rio de Janeiro, por exemplo, situa-se em Zonas Costeiras de Baixa Elevação, o que torna o território particularmente exposto aos efeitos da elevação do nível médio do mar, ao aumento da energia de ressacas marinhas e a inundações severas, especialmente em áreas onde a expansão urbana redefiniu a orla e ocupou ecossistemas de drenagem natural (Rodrigues *et al.*, 2022). Além disso, a barreira orográfica da Serra do Mar atua como um fator de intensificação de chuvas torrenciais ao interceptar sistemas meteorológicos provenientes do oceano, como frentes frias e ciclones extratropicais (Aguiar; Ervatti, 2020).

Inserido quase integralmente no bioma Mata Atlântica (Coelho *et al.*, 2017), o Estado do Rio de Janeiro abriga uma biodiversidade extraordinária que desempenha funções ambientais essenciais. Esse ecossistema é responsável pela manutenção do ciclo da água, a regulação do microclima e formação de solos, além de processos ecológicos fundamentais como polinização, dispersão de sementes e controle de pragas (Pimenta, 2024), elementos essenciais para a resiliência do território diante do cenário climático atual.

Com base nos dados do Censo 2022, o Estado do Rio de Janeiro consolida-se como um dos territórios mais urbanizados e densamente povoados do Brasil (IBGE, 2023) e apresenta elevada suscetibilidade a desastres naturais em razão da combinação de características geográficas e do clima tropical úmido (Aguiar; Ervatti,

2020). Além disso, a crescente pressão antrópica, marcada pela expansão de rodovias, pastagens, áreas urbanizadas e pelo desmatamento, resulta em um processo duplo de degradação: perda de cobertura vegetal, reduzindo a área total do bioma, e a fragmentação de habitats, que subdivide os remanescentes em 'ilhas' florestais isoladas e vulneráveis ao efeito de borda (Teixeira *et al.*, 2022), serviços estes, entendidos aqui, como os bens e recursos que as populações obtêm dos ecossistemas e que lhes conferem benefícios fundamentais à sobrevivência e bem-estar, sejam eles diretos, como o abastecimento de água, ou indiretos, como a regulação climática (Ferreira, 2024 ; Wrege *et al.*, 2015).

A degradação da Mata Atlântica é agravada pela recorrência de incêndios florestais durante os períodos secos, especialmente entre agosto e outubro (Clemente; Oliveira Júnior; Louzada, 2017). Esses eventos, geralmente provocados por ações humanas, como queimadas agrícolas ou criminosas, e potencializados por condições climáticas favoráveis, acarretam severas perdas de biodiversidade, intensificam a emissão de gases de efeito estufa, alteram o regime hídrico e aceleram a fragmentação dos remanescentes florestais. Como consequência, dificultam a regeneração natural e aumentam a vulnerabilidade do ecossistema diante de novas perturbações (Clemente; Oliveira Júnior; Louzada, 2017).

Além disso, as áreas urbanas e costeiras do Rio de Janeiro enfrentam grandes desafios ambientais. Apesar da existência de um arcabouço legal robusto, como a Lei da Mata Atlântica, observa-se um descompasso entre a norma e a gestão prática (Adams *et al.*, 2020; Faria *et al.*, 2021), em que a falta de capacidade técnica municipal (Silva Neto; Ribeiro; Rodrigues, 2024) e falhas na fiscalização (Teixeira *et al.*, 2022) permitem a continuidade da fragmentação florestal.

Não apenas a capital, mas todo o território fluminense apresenta alta vulnerabilidade a eventos climáticos extremos. Enquanto a Região Metropolitana e as baixadas costeiras sofrem com a pressão da urbanização sobre ecossistemas de restinga e manguezal (Rodrigues *et al.*, 2022), as regiões Serrana e do Médio Paraíba enfrentam riscos associados à ocupação de encostas e supressão de nascentes (Aguiar; Ervatti, 2020).

Nesse cenário, o aquecimento do planeta intensifica a ocorrência de eventos extremos, como tempestades e períodos secos, ampliando os riscos para a população local (Aguiar; Ervatti, 2020). A degradação florestal, por sua vez, compromete a capacidade de regulação natural dos ecossistemas, agravando os

impactos desses fenômenos. De acordo com o IPCC (2021), o aumento das temperaturas globais atua como catalisador dessas instabilidades, reforçando a necessidade de medidas de conservação e adaptação.

Como consequência, essa degradação acelerada leva à perda de nutrientes do solo, fragmentação de habitats e redução da biodiversidade, com consequências diretas para a fauna e flora locais. A erosão do solo, causada pela falta de cobertura vegetal, resulta no assoreamento de rios e lagos, comprometendo a qualidade da água e a biodiversidade aquática (Teixeira *et al.*, 2022; Wrege *et al.*, 2015). Ademais, sob condições de elevado estresse e degradação, estes remanescentes da Mata Atlântica podem deixar de atuar como sumidouro para se tornarem emissores líquidos de gases de efeito estufa (CO₂ e CO₂eq), agravando os efeitos do aquecimento global (Bueno; Valeriano, 2024).

As mudanças climáticas exacerbam os impactos do desmatamento, com consequências sérias para a estabilidade climática da Mata Atlântica e os serviços ecossistêmicos que ela oferece. Além dos impactos ambientais, os efeitos econômicos também são expressivos, pois desastres relacionados ao clima no Rio de Janeiro geraram perdas estimadas entre R\$ 48,4 e 54,5 bilhões de 2001-2010, aproximadamente 1,3 % do Produto Interno Bruto (PIB) do Estado em 2010 (Young; Aguiar; Possas, 2014).

Diante do exposto, é notório que a degradação ambiental e as mudanças climáticas no Estado do Rio de Janeiro representam uma ameaça crescente para a região, com sérias implicações para a sustentabilidade ambiental, econômica e social. A perda de vegetação nativa, a fragilidade dos ecossistemas e a intensificação de desastres naturais exigem uma abordagem integrada, que leve em conta tanto a recuperação ambiental quanto a adaptação climática.

Assim, emerge o seguinte problema de pesquisa: De que forma a evolução histórica do uso e cobertura da terra no Estado do Rio de Janeiro, entre 1985 e 2024, tem contribuído para a intensificação da fragmentação da paisagem e, em interação com fatores naturais como relevo e clima, tem alterado os padrões de ocorrência e a intensidade dos eventos extremos de temperatura e precipitação, ampliando a vulnerabilidade ambiental e os riscos de desastres?

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho foi analisar a degradação ambiental no Estado do Rio de Janeiro, considerando a caracterização física e ambiental do território, integrando a dinâmica do uso e cobertura da terra entre 1985 e 2024 e a análise de eventos climáticos extremos. Busca-se compreender os nexos entre a fragmentação da paisagem e as instabilidades climáticas, de modo a subsidiar estratégias de adaptação climática.

Os objetivos específicos são:

- ✓ Caracterizar a área de estudo a partir de seus aspectos físicos e ambientais, com foco na variação altimétrica e na dinâmica climática (precipitação e temperatura), evidenciando fatores de suscetibilidade natural (relevo e clima) que influenciam a propensão do território a desastres.
- ✓ Investigar os padrões de transformação da paisagem e a dinâmica de fragmentação entre 1985 e 2024, utilizando dados do MapBiomas, a fim de identificar os vetores de pressão antrópica que elevam a vulnerabilidade do território.
- ✓ Identificar e analisar eventos extremos de temperatura e precipitação, avaliando tendências e mudanças significativas com base em séries históricas de dados meteorológicos.

1.2 Estrutura do Trabalho

A dissertação está organizada em sete capítulos que estruturam o percurso da pesquisa. O Capítulo 1 apresenta a introdução, na qual são expostos o problema, a justificativa e os objetivos do estudo. Em seguida, o Capítulo 2 corresponde à revisão da literatura, reunindo o referencial teórico e conceitual sobre degradação ambiental, mudanças climáticas e estratégias de conservação. O Capítulo 3 apresenta a metodologia adotada, especificando os procedimentos de análise espacial e de séries temporais. O Capítulo 4 contempla os resultados e a discussão, com a análise e interpretação dos principais resultados relacionados aos padrões espaciais e climáticos. O Capítulo 5 apresenta o produto tecnológico desenvolvido,

materializado na cartilha instrucional "Guia Metodológico para Processamento de Dados do MapBiomias: do Download à Análise Espacial". Enquadrado como Material Didático e Instrucional pela CAPES, o documento descreve um roteiro técnico que busca democratizar o acesso às ferramentas de sensoriamento remoto e ao monitoramento autônomo do uso e cobertura da terra. O Capítulo 6 reúne as conclusões, sintetizando as contribuições do estudo, apontando suas limitações e sugerindo desdobramentos futuros. Por fim, o Capítulo 7 apresenta as referências bibliográficas utilizadas ao longo do trabalho.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 O Bioma Mata Atlântica no Cenário de Degradação Ambiental

A cobertura vegetal nativa do Brasil, que em 1985 correspondia a 76% do território nacional, atualmente está reduzida a cerca de 64,5% (MapBiomias, 2024). Essa diminuição expressiva reforça a urgência de conservar os seis biomas brasileiros: Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal, cada um com características únicas de vegetação e fauna (Brasil, 2024).

A Amazônia, maior bioma do país, ocupa aproximadamente 49,5% do território brasileiro (IBGE, 2024a). Embora mantenha a maior área contínua de vegetação nativa, sua preservação enfrenta pressões antrópicas crescentes que ameaçam seu equilíbrio ecológico (Brasil, 2024). O Cerrado, a savana brasileira, abrange cerca de 23,3% do território nacional (IBGE, 2024a) e possui relevância hídrica estratégica, abrigando as nascentes das três maiores bacias hidrográficas da América do Sul (Brasil, 2024). Já o Pantanal, a maior planície alagada contínua do mundo, ocupa 1,8% do país e destaca-se pela rica biodiversidade resultante da confluência de diversos ecossistemas (Brasil, 2024; IBGE, 2024a).

Em zonas de clima mais sazonal, a Caatinga predomina no semiárido nordestino (10,1% do território), enfrentando processos de degradação do solo vinculados ao uso extrativista e à pecuária (Brasil, 2024; IBGE, 2024a). No extremo sul, o Pampa cobre 2,3% do território nacional, sendo composto por campos nativos de alta importância biológica, mas que sofrem com a conversão para monoculturas (IBGE, 2024a).

Nesse cenário de perdas generalizadas, a Mata Atlântica apresenta o quadro mais crítico de fragmentação (Fundação SOS Mata Atlântica; INPE, 2024). Considerada um *hotspot* mundial para a conservação da biodiversidade (Myers *et al.*, 2000), o bioma abrange atualmente cerca de 13% do território brasileiro (IBGE, 2024a). Originalmente, sua extensão cobria mais de 1,3 milhão de km² (Cardoso, 2016), mas hoje restam apenas cerca de 29% de sua cobertura original, considerando-se todos os estágios de regeneração (Brasil, 2024; MapBiomias, 2024).

2.1.1 Importância Ecológica e Serviços Ecossistêmicos

O bioma Mata Atlântica, atualmente reduzido e altamente fragmentado, é considerado um *hotspot* mundial para a conservação da biodiversidade (Myers *et al.*, 2000). É importante destacar, contudo, que este conceito possui aplicações distintas e complementares na literatura científica, referindo-se tanto à conservação da biodiversidade quanto à vulnerabilidade perante as mudanças climáticas.

Sob a ótica da biodiversidade, Myers *et al.* (2000) define *hotspots* como áreas que concentram espécies endêmicas em níveis excepcionais e que sofrem perda expressiva de habitat, contendo pelo menos 0,5% ou 1.500 das espécies de plantas do mundo como endêmicas e tendo perdido 70% ou mais de sua vegetação primária. Paralelamente, no campo da climatologia, o termo é utilizado para identificar regiões com alta sensibilidade às variações globais. Segundo Giorgi (2006), um *hotspot* de mudanças climáticas é uma área que apresenta uma resposta mais intensa e rápida aos desvios de temperatura e precipitação em comparação com a média global, sendo identificada através da variabilidade interanual desses indicadores. Nesse contexto, de um lado, a degradação histórica de seus ecossistemas (Myers *et al.*, 2000), que compromete a capacidade de resiliência do território; de outro, a intensificação das instabilidades climáticas (Giorgi, 2006), que amplifica os riscos tanto para a biodiversidade quanto para as populações humanas.

Embora o bioma apresente aproximadamente 29% de sua extensão original ao considerar todos os estágios de regeneração (Brasil 2024; MapBiomas, 2024), estima-se que apenas 12,4% de sua área original corresponda atualmente a florestas maduras e bem preservadas (Fundação SOS Mata Atlântica, 2026). Essa drástica redução resultou em uma paisagem severamente fragmentada e marcada por remanescentes isolados, como demonstrado por Ribeiro *et al.* (2009), que destacam que mais de 80% dos fragmentos florestais remanescentes possuem menos de 50 hectares, estando a maioria deles isolados uns dos outros. Além disso, quase metade da floresta restante está localizada a menos de 100 metros das bordas, o que expõe esses ecossistemas a fortes efeitos de borda, comprometendo a biodiversidade e os processos ecológicos. Segundo esses autores, essa configuração espacial exige medidas urgentes que priorizem não apenas a proteção dos grandes remanescentes, mas também a reconexão funcional da paisagem.

Apesar da intensa redução, as áreas remanescentes da Mata Atlântica preservam uma diversidade única de espécies e prestam serviços ambientais essenciais (Wrege *et al.*, 2015). Marques *et al.* (2021) ressaltam que a diversidade da Mata Atlântica está ligada à hipótese neotectônica, na qual o soerguimento de cadeias de montanhas, especialmente a Serra do Mar na região sudeste, modificou o clima e criou novas condições e paisagens para a diversificação local. Como reflexo dessa complexidade, os autores afirmam que, em geral, a maior riqueza de espécies é encontrada justamente nas costas topograficamente complexas dos estados de São Paulo e Rio de Janeiro.

Além da biodiversidade, o bioma exerce um papel fundamental na regulação do clima e do ciclo hidrológico, apresentando grande variabilidade, com temperaturas e valores pluviométricos que podem variar significativamente ao longo do ano e entre as diferentes regiões do bioma (Cardoso, 2016). Essa heterogeneidade climática e geomorfológica contribui para a formação de diversas fitofisionomias, isto é, diferentes tipos de cobertura vegetal, que abrangem desde a floresta ombrófila densa até áreas de restinga e manguezais (Joly; Metzger; Tabarelli, 2014). Tais ecossistemas desempenham funções essenciais, atuando na proteção de encostas íngremes, na estabilidade do solo e na regulação dos níveis de rios e reservatórios, garantindo o abastecimento hídrico (Joly; Metzger; Tabarelli, 2014; Cardoso, 2016).

2.1.2 Histórico de Ocupação e Degradação Ambiental

A ocupação humana trouxe um histórico de exploração e manipulação do bioma Mata Atlântica iniciado logo após a chegada dos colonizadores europeus, há mais de 500 anos. Esse processo decorre da exploração intensiva dos recursos naturais e de uma expansão urbana acelerada, que reflete as dinâmicas de ocupação do território e as estruturas socioeconômicas vigentes (Cardoso, 2016; Pimenta, 2024). Conforme a Fundação SOS Mata Atlântica (2026), a Mata Atlântica é um dos biomas mais populosos do planeta, abrigando mais de 145 milhões de brasileiros, o que corresponde a mais de 70% da população nacional, além de concentrar 80% do PIB nacional. Grandes centros urbanos como o Rio de Janeiro estão inseridos nesse bioma, evidenciando a importância da Mata Atlântica para a vida de milhões de pessoas.

A Mata Atlântica configura-se como um dos biomas mais devastado e ameaçado do planeta (Pimenta, 2024; Fundação SOS Mata Atlântica, 2026). Devido à sua ocupação histórica secular, o bioma apresenta um ritmo de transformações antrópicas considerado um dos mais rápidos já observados em ecossistemas tropicais (Cardoso, 2016), o que agrava a urgência de medidas de preservação para os seus remanescentes. Essa pressão reflete-se nos dados de cobertura vegetal. Conforme esclarecem Martins *et al.* (2021), embora cerca de 29% do bioma apresente cobertura por formações florestais (considerando vegetação secundária e estágios iniciais de regeneração), apenas 12,4% correspondem a florestas maduras e bem preservadas, compostas por fragmentos acima de três hectares (Fundação SOS Mata Atlântica, 2026), destacando o desmatamento contínuo e a fragmentação dos remanescentes como graves ameaças à conservação do bioma (Martins *et al.*, 2021; Fundação SOS Mata Atlântica; INPE, 2024).

Esses fatores, associados às mudanças climáticas, comprometem os serviços ecossistêmicos, como a regulação climática e o armazenamento de carbono, contribuindo para a fragmentação de habitats e a erosão do solo (Wrege *et al.*, 2015). A perda dessa cobertura altera os microclimas locais, comprometendo a regulação hídrica. As florestas atuam como esponjas naturais, interceptando a água da chuva e liberando-a gradualmente no ambiente. Com a remoção da vegetação, a capacidade de armazenamento de água diminui, aumentando o risco de erosão, enchentes e secas (Gotardo *et al.*, 2019).

Essas alterações ameaçam a Mata Atlântica e outros biomas, causando aumento da fragmentação da vegetação e da degradação de habitats, erosão dos solos, assoreamento de corpos d'água, levando, em longo prazo, ao declínio de ecossistemas, que oferecem serviços ecossistêmicos, como a purificação do ar e da água, a regulação do clima e da ocorrência de pragas e doenças, a proteção contra desastres naturais, a estocagem de carbono, entre outros, essenciais para a sustentabilidade dos ecossistemas e a manutenção da vida (Wrege *et al.*, 2015).

Apesar desse cenário crítico, Pimenta (2024) esclarece que o desmatamento diminuiu nos primeiros meses de 2023, após anos de crescimento contínuo. Essa queda indica uma nova fase de proteção e recuperação da Mata Atlântica, com a expectativa de que o bioma possa ser o primeiro no Brasil a alcançar o desmatamento zero nos próximos anos (Pimenta, 2024). Essa tendência alinha-se à perspectiva de Rezende *et al.* (2018), que propõem que a Mata Atlântica possui o

potencial de transitar de um *hotspot* de biodiversidade ameaçada para um “*hopespot*” (ponto de esperança), onde a história de degradação pode ser convertida em um futuro sustentável através do alto potencial de regeneração natural e de políticas de restauração florestal.

2.2 Impactos das Mudanças Climáticas na Mata Atlântica

O mais recente relatório do IPCC (2023) confirma a relação entre o aumento da temperatura global e a intensificação de eventos climáticos extremos, como ondas de calor, secas, precipitações intensas, além de acelerar o derretimento das geleiras e a perda de cobertura de neve em regiões polares. Nobre *et al.* (2007), em relatório para o Ministério do Meio Ambiente (MMA), alertavam que além da Amazônia, a Mata Atlântica seria fortemente impactada por essas alterações, com intensificação da perda de carbono e riscos à biodiversidade.

A variabilidade da precipitação na Mata Atlântica é condicionada pela interação entre sua complexa topografia e sistemas atmosféricos de múltiplas escalas, que atuam de forma integrada e determinam os padrões climáticos regionais. É importante destacar que tais sistemas compõem ciclos naturais de variabilidade ao qual o bioma está historicamente adaptado; o risco atual, portanto, não reside na variabilidade intrínseca, mas na componente antropogênica que altera a frequência e a magnitude desses fenômenos (IPCC, 2021). Enquanto processos naturais como períodos secos podem atuar na ciclagem de nutrientes, a intensificação dessas estiagens decorrente das mudanças climáticas, somada à fragmentação florestal, compromete a resiliência do ecossistema.

Conforme Luiz-Silva *et al.* (2021), a climatologia do bioma é ditada por mecanismos específicos: enquanto no setor norte a precipitação é modulada pela posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e pelos Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL) sob influência do Atlântico Tropical, as regiões central e sudeste dependem da organização da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e do transporte hídrico da bacia Amazônica via Jatós de Baixos Níveis. Nessas áreas, a presença de barreiras orográficas, como a Serra do Mar, intensifica a ascensão de massas úmidas, garantindo a manutenção de microclimas florestais. Já no setor meridional, a recorrência de frentes frias e Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) eleva a intensidade média diária das chuvas e o volume máximo

registrado em apenas 24 horas, evidenciando que a resiliência hídrica do bioma deriva de uma dinâmica sinótica e regionalizada, e não apenas de fenômenos climáticos globais de grande escala.

As alterações nos padrões de precipitação afetam diretamente os serviços ecossistêmicos da Mata Atlântica, comprometendo a regulação hídrica essencial para a indústria, a agricultura e o fornecimento de energia elétrica (Marengo *et al.*, 2015). Conforme destacam Marengo, Tomasella e Nobre (2017), a intensificação de eventos extremos tem gerado prejuízos crescentes, evidenciando a vulnerabilidade das regiões densamente povoadas que dependem da integridade deste bioma. Um exemplo crítico foi a crise hídrica de 2014-2015, no Sudeste do Brasil, onde um bloqueio atmosférico anômalo persistiu por 45 dias, impedindo a chegada de frentes frias e o transporte de umidade da Amazônia (Marengo *et al.*, 2015). Embora o gatilho da crise tenha sido meteorológico, o colapso do Sistema Cantareira revelou que a degradação da cobertura vegetal nas bacias contribuiu para a severidade do impacto. Marengo *et al.* (2015) ponderam que a crise foi agravada por fatores antrópicos, como o aumento da demanda e a gestão dos recursos, reforçando que a segurança hídrica regional é indissociável da conservação dos remanescentes florestais da Mata Atlântica frente à variabilidade climática.

Nesse contexto, Artaxo (2025) discute que as projeções apontam para um cenário de agravamento da crise climática, caracterizado por um aumento na incidência e intensidade de eventos climáticos extremos, como secas, inundações e tempestades. Essa realidade exige que a sociedade se prepare para um futuro mais imprevisível e extremo, demandando ações urgentes para reduzir os impactos adversos tanto nos ecossistemas quanto nas estruturas socioeconômicas.

Estudos recentes reforçam as preocupações sobre os impactos dessas mudanças na biodiversidade da Mata Atlântica. Lima *et al.* (2024), indicam que 82% das quase 5.000 espécies de árvores exclusivas desse bioma estão ameaçadas de extinção. As projeções de Vale *et al.* (2021) reforçam esse quadro ao indicar um agravamento da vulnerabilidade do bioma, com uma reorganização geográfica forçada das espécies em direção a maiores altitudes ou latitudes, em busca de condições climáticas mais amenas. Essa pressão ecológica é fundamentada em modelos climáticos convergentes: enquanto o IPCC (2023) estima um aumento de até 4°C para a América do Sul em cenários pessimistas até o final do século, as projeções específicas para a Mata Atlântica são ainda mais alarmantes.

Sob o cenário de altas emissões (RCP 8.5), Vale *et al.* (2021) preveem um aquecimento médio para o bioma entre 4,8°C e 5,6°C, corroborado pelo relatório do MMA “Impactos da Mudança do Clima na Mata Atlântica” (Brasil, 2018), que, utilizando modelos como Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, simula elevações de 2°C a 6°C em grande parte da Mata Atlântica. Tais projeções regionais superam as médias globais e continentais por considerarem a resposta térmica específica da cobertura superficial e os mecanismos de retroalimentação (feedbacks) entre a superfície e a atmosfera, que intensificam a retenção de calor e a severidade de eventos extremos (IPCC, 2021; Vale *et al.*, 2021).

Nesse contexto, o sexto relatório do IPCC (2023) confirma que as atividades humanas já elevaram a temperatura global em 1,1°C, com tendência de atingir 1,5°C nas próximas décadas. Esse panorama impõe riscos crescentes a ecossistemas já fragmentados como a Mata Atlântica (Martins *et al.*, 2021; Cardoso, 2016), o que aponta para a necessidade de adoção de medidas drásticas e imediatas. O relatório reforça a necessidade de limitar o aquecimento a 1,5°C, conforme o Acordo de Paris, o que demanda a integração entre políticas globais de redução de emissões e esforços locais de conservação, como a aplicação rigorosa da Lei da Mata Atlântica e projetos de restauração de áreas degradadas.

No âmbito das estratégias de gestão territorial, as Áreas de Proteção Ambiental (APA) desempenham um papel crucial, mas enfrentam desafios substanciais de governança. Carvalho, Silva e Salvio (2022), ao analisarem a vulnerabilidade institucional e ambiental de APAs na região Sudeste, apontam que, embora a maioria dessas áreas apresente vulnerabilidade baixa ou média, a falta de instrumentos de gestão efetivos é crítica: apenas 25% das unidades analisadas possuíam Planos de Manejo e cerca de 66% contavam com Conselhos Gestores. Essa lacuna na gestão pode aumentar a suscetibilidade desses territórios à pressão antrópica, especialmente a expansão urbana e agrícola, comprometendo sua eficácia como estratégia de conservação. A adaptação às mudanças climáticas torna-se uma prioridade, com metas de redução de emissões e a manutenção da biodiversidade para garantir a resiliência dos biomas brasileiros frente aos desafios climáticos iminentes (Nações Unidas Brasil, 2019; IPCC, 2023).

2.3 Climatologia e Eventos Extremos no Estado do Rio de Janeiro

A climatologia do Estado do Rio de Janeiro é marcada por uma heterogeneidade espacial, resultante da interação complexa entre a circulação atmosférica, a maritimidade e, fundamentalmente, a topografia acidentada (Silva; Dereczynski, 2014; Sobral *et al.*, 2018). Essa configuração estabelece gradientes expressivos de temperatura e precipitação em curtas distâncias, resultando em variações climáticas que alternam entre áreas litorâneas úmidas e regiões serranas com características distintas (Sobral *et al.*, 2018).

Essa diversidade é evidenciada pela classificação de Köppen aplicada ao Brasil por Alvares *et al.* (2013), que identifica variações entre o clima tropical com inverno seco (Aw) nas baixadas e litoral, e o subtropical de altitude (Cwa e Cwb) nas áreas mais elevadas das serras do Mar e da Mantiqueira. Nessas regiões serranas, os verões tendem a ser amenos e os invernos secos, diferindo do padrão tropical típico do restante do Estado.

Segundo Silva e Dereczynski (2014), as temperaturas mínimas do ar no estado apresentam variações relacionadas à altitude e à proximidade do mar. Na Região Serrana, as médias mínimas oscilam entre 9,5 e 11°C no inverno e entre 15,5 a 17°C no verão; já em áreas de baixadas e planícies, as médias mínimas variam de 17 a 18,5°C no inverno e entre 21,5 a 23°C no verão. Essa dependência geográfica também rege as temperaturas máximas anuais, que tendem a ser naturalmente mais elevadas em regiões tropicais em comparação às áreas de clima temperado. Na Região Serrana, as médias máximas ficam entre 21,5 e 23°C no inverno e entre 26 e 27,5°C no verão. Já na Região Metropolitana e no Norte/Noroeste Fluminense, essas médias aumentam para 26 a 27,5°C no inverno e 32 a 33,5°C no verão. O efeito da ilha de calor urbano na Região Metropolitana eleva as temperaturas em relação às áreas menos urbanizadas. No litoral, a Costa Verde registra médias máximas entre 23 e 24,5°C no inverno e entre 29 e 30,5°C no verão, enquanto o Vale do Paraíba e o Centro-Sul apresentam médias de 24,5 a 26°C no inverno e de 29 a 30,5°C no verão (Silva; Dereczynski, 2014).

Assim como a temperatura do ar, a precipitação no Estado do Rio de Janeiro é fortemente influenciada pela topografia local (Rio de Janeiro, 2011). As áreas montanhosas, como a Serra do Mar e a Serra da Mantiqueira, concentram as maiores quantidades de chuva devido ao efeito orográfico, que ocorre quando o ar

úmido é forçado a ascender, resultando na condensação e precipitação da umidade. Tal processo demonstra a influência da topografia no clima local, com implicações relevantes para a hidrologia e a ecologia de regiões montanhosas (Arthur; Saffer, 2017).

A distribuição das chuvas é um reflexo direto dessa dependência orográfica. Silva e Dereczynski (2014) detalham que a divisa entre a região Metropolitana e as Baixadas Litorâneas com a região Serrana atinge os maiores acumulados do Estado, variando entre 2.500 e 2.800 mm anuais. Essa influência orográfica é corroborada pelo Comitê da Bacia Hidrográfica dos Rios Macaé e das Ostras (2012), que aponta valores de até 2.500 mm/ano nas cabeceiras serranas do rio Macaé. Em contrapartida, as planícies costeiras e as baixadas apresentam menores valores pluviométricos, maior evapotranspiração e uma estação seca mais pronunciada (Sobral *et al.*, 2018; Rio de Janeiro, 2011). Nesse contexto, o Norte e o Noroeste Fluminense destacam-se pelos menores valores pluviométricos anuais do Estado, evidenciando o contraste hídrico regional (Sobral *et al.*, 2018).

A dinâmica atmosférica responsável por esses regimes está associada principalmente à passagem de Frentes Frias e à formação da ZCAS. De acordo com Luiz-Silva *et al.* (2021), a ZCAS constitui-se como uma banda de nebulosidade e precipitação com orientação noroeste-sudeste, que atua como um persistente canal de umidade conectando a bacia Amazônica ao Sudeste do Brasil e ao Oceano Atlântico Sul adjacente. Conforme os estudos de Carvalho, Jones e Liebmann (2004) e a análise regional de Sobral *et al.* (2018), este é o sistema predominante para a geração de chuvas persistentes no verão da região Sudeste. No entanto, é fundamental diferenciar a atuação desses sistemas de larga escala dos extremos locais. Enquanto frentes e ZCAS fornecem o aporte de umidade regional, a topografia acidentada do Rio de Janeiro atua como um gatilho local: o efeito de barlavento na Serra do Mar força a ascensão desse ar úmido, gerando chuvas orográficas mais intensas e localizadas (Sobral *et al.*, 2018; Machado *et al.*, 2010).

É nesse contexto de variabilidade e interação de escalas que se insere a discussão sobre a intensificação dos fenômenos. O regime de chuvas apresenta marcada sazonalidade, conforme evidenciam Tavares e Santos (2022). No verão (dezembro a fevereiro), as chuvas são mais intensas em todo o estado, impulsionadas pela ZCAS e pelo aquecimento diurno. Já no inverno (junho a agosto), registram-se os menores valores pluviométricos incluindo valores mínimos,

médios e máximos. Sobral *et al.* (2018) evidenciaram que, nessa dinâmica anual, as Baixadas Litorâneas e a Costa Verde tendem a apresentar acumulados acima da média estadual, enquanto o Centro-Sul e o Norte/Noroeste registram valores consistentemente inferiores.

A literatura científica apresenta diversas perspectivas teóricas sobre o que caracteriza um evento extremo, sendo sua definição prática dependente da abordagem adotada: estatística, social ou física (Luiz-Silva; Oscar-Júnior, 2022; Monteiro; Zanella, 2023). Independentemente da definição, observa-se uma alteração no padrão desses eventos no Estado do Rio de Janeiro.

Silva e Dereczynski (2014), ao analisarem dados de 1975 a 2015, indicaram uma tendência de aumento tanto no volume anual total de chuvas quanto na ocorrência de precipitações intensas, especialmente nas Baixadas Litorâneas e na Região Metropolitana. Também observaram um acréscimo no número de dias consecutivos sem chuva, concentrando chuvas intensas em períodos mais curtos. Luiz-Silva e Oscar-Júnior (2022) apontam um crescimento na precipitação total anual em muitas áreas costeiras, onde a média anual saltou de cerca de 350 mm na segunda metade do século XX para aproximadamente 500 mm em registros mais recentes.

Essa combinação de sazonalidade definida, relevo acidentado, chuvas intensas; quando associada a modelos de ocupação territorial vulneráveis, têm consequências diretas na segurança da população. Sob a ótica do risco socioambiental, a vulnerabilidade da ocupação potencializa a suscetibilidade natural do terreno, resultando em inundações e deslizamentos de terra que, entre 2001 e 2010, responderam por cerca de 89% dos desastres naturais no estado (Young; Aguiar; Possas, 2014). O impacto humano é severo, pois apenas entre 2010 e 2011, mais de mil mortes foram registradas em eventos extremos, com destaque para as tragédias em Angra dos Reis, Niterói e na Região Serrana (Dourado; Arraes; Silva, 2012).

O 'Megadesastre' da Região Serrana do Estado, em janeiro de 2011, ilustra a magnitude desses eventos. Desencadeado por um evento de precipitação extrema, com acumulado de 241,8 mm em apenas 24 horas. A intensidade desse evento, marcado por um pico de 61,8 mm em uma hora, em conjunto com a precipitação acumulada de 573,6 mm nos primeiros 12 dias do mês, desencadeou um dos maiores eventos de movimentos de massa do Brasil, impactando severamente

idades como Nova Friburgo, Teresópolis e Petrópolis (Dourado; Arraes; Silva, 2012). Ainda que os registros oficiais apontem 947 óbitos, estima-se que o impacto real tenha sido consideravelmente superior, dadas as dificuldades na contabilização de desaparecidos e a extensão dos danos socioeconômicos. Apesar de serem fenômenos de matriz natural, Young, Aguiar e Possas (2014) alertam que a frequência dessas chuvas extremas tende a aumentar com as mudanças climáticas, agravando os impactos socioeconômicos em um cenário onde ações preventivas ainda são escassas.

Diante desse quadro, Young, Aguiar e Possas (2014) reforçam a urgência de implementar medidas de monitoramento de riscos e adaptação. O aumento da frequência de extremos climáticos demanda respostas eficazes das autoridades para mitigar danos à infraestrutura, proteger comunidades vulneráveis e preservar ecossistemas. A inércia frente a esses desafios pode exacerbar os problemas existentes, resultando em custos humanos e financeiros cada vez mais elevados.

2.4 Políticas Públicas e Governança Ambiental na Mata Atlântica: Avanços e Desafios

A governança ambiental na Mata Atlântica deve ser compreendida para além do arcabouço normativo, envolvendo a análise da capacidade institucional e da efetividade dos instrumentos de gestão na prática. Há uma complexidade inerente nas relações entre a legislação ambiental escrita e a realidade da degradação, em que frequentemente se observa um descompasso entre o 'dever-ser' legal e a prática da gestão pública (Adams *et al.*, 2020; Vale *et al.*, 2021).

O marco regulatório central é composto pela Lei Federal nº 11.428/2006 (Lei da Mata Atlântica) e pela Lei nº 12.651/2012 (Novo Código Florestal) (Brasil, 2006; 2012b). Para operacionalizar essas normas no território, os municípios do Estado do Rio de Janeiro elaboram o Plano Municipal de Conservação e Recuperação da Mata Atlântica (PMMA), regulamentado pelo Decreto Federal nº 6.660/2008 (Brasil, 2008).

O PMMA atua como o principal instrumento de planejamento local, definindo áreas prioritárias para conservação, sendo sua implementação tecnicamente fomentada pela Superintendência de Gestão Ecosistêmica (SUPGECOS) da Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade (Rio de Janeiro, 2024a). Desde 2020, a elaboração e implementação dos PMMAs tornaram-se critérios

progressivos de pontuação para o repasse de recursos tributários, bonificando as prefeituras que cumprem metas de execução que variam de 10% (ano 1) a 100% (ano 5) das ações previstas (Rio de Janeiro, 2024a). Contudo, dados recentes indicam que a efetividade desse incentivo ainda é limitada, pois, dos 34 planos avaliados em 2024, apenas oito municípios atingiram a bonificação máxima, evidenciando dificuldades na fase executiva das políticas (INEA, 2024).

A proteção do bioma no Rio de Janeiro estrutura-se em um sistema que combina leis restritivas, incentivos econômicos e monitoramento tecnológico e incentivos econômicos à conservação. O principal indutor financeiro para a adesão dos municípios a esse planejamento é o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) Ecológico (ou ICMS Verde). Trata-se de um mecanismo tributário extrafiscal que redistribui parcelas maiores do imposto aos municípios que cumprem critérios de preservação ambiental e qualidade de vida (Brasil, 2008; Rio de Janeiro, 2024a).

No eixo de controle e monitoramento, destaca-se o Programa Olho no Verde implementado em 2016. Esta política pública utiliza imagens de satélite de alta resolução para identificar desmatamentos a partir de 200 m², gerando alertas que subsidiaram mais de 1.800 ações fiscalizatórias e integraram municípios através da "Rede Parceiro Olho no Verde" (Rio de Janeiro, 2023a). Complementarmente, o monitoramento independente do Atlas dos Remanescentes Florestais corrobora a tendência de redução no ritmo de desmatamento, registrando uma queda de 71% no estado ao comparar os intervalos de 2021-2022 e 2022-2023; entretanto, a supressão de fragmentos maduros (acima de 3 hectares) ainda ocorre, totalizando a perda de 70 hectares de florestas nativas no território fluminense no período mais recente (2022-2023) (Fundação SOS Mata Atlântica; INPE, 2024).

A continuidade da supressão em fragmentos de elevado valor ecológico, apesar da sofisticação tecnológica empregada nos sistemas de monitoramento, evidencia falhas estruturais na governança apontadas pela literatura. Adams *et al.* (2020) e Vale *et al.* (2021) argumentam que, embora o arcabouço legal seja robusto, a gestão pública enfrenta barreiras de implementação e descontinuidade administrativa que impedem a consolidação de Políticas de Estado perenes. Essa fragilidade institucional reverbera na execução da fiscalização: Oliveira, Alves e Ferreira (2018) identificaram gargalos na conversão dos autos de infração em punição efetiva (impunidade), enquanto Teixeira *et al.* (2022) confirmaram que o

aumento da pressão antrópica sobre as Unidades de Conservação (UC) é agravado pela insuficiência crônica de recursos humanos e financeiros para o controle *in loco*.

Além dos desafios relacionados ao comando e controle, existem entraves técnicos e normativos que dificultam a transição da conservação para a recuperação. Faria *et al.* (2021) destacam que a sobreposição de regras entre o Código Florestal e a Lei da Mata Atlântica gera, por vezes, insegurança jurídica na aplicação da proteção. Essa complexidade reforça a análise de Bueno e Valeriano (2024), os quais apontam que, embora a legislação vigente tenha se mostrado eficaz em desacelerar o desmatamento massivo, uma tendência confirmada pela queda de 71% no desmatamento do Rio de Janeiro entre os períodos de 2022 e 2023 (Fundação SOS Mata Atlântica; INPE, 2024), ela ainda revela baixa efetividade em promover a recomposição florestal ativa na dimensão necessária.

Nesse sentido, o principal gargalo recai sobre a capacidade executiva local, frequentemente sobrecarregada por atribuições constitucionais delegadas aos municípios sem a correspondente transferência de recursos ou suporte institucional dos demais entes federativos. Ao analisar a recuperação de bacias hidrográficas, Silva Neto, Ribeiro e Rodrigues (2024) enfatizam que o sucesso depende da implementação rigorosa de Planos de Recuperação de Áreas Degradadas. Os autores alertam que a falta de expertise técnica nos municípios para realizar diagnósticos precisos sobre os métodos de restauração (como a escolha entre plantio de mudas ou condução da regeneração natural) compromete a eficácia das ações. Contudo, essa carência técnica é indissociável de uma estrutura de governança fragmentada, onde a descentralização de competências ambientais, muitas vezes desacompanhada de autonomia financeira, mascara crises estruturais de gestão e é permeada por dinâmicas de poder político-eleitoral local. Tal cenário perpetua o passivo ambiental mesmo diante da existência de instrumentos de fomento como o ICMS Ecológico.

2.5 Conceitos Fundamentais e Definições de Termos

Considerando a natureza interdisciplinar desta pesquisa, esta seção estabelece o entendimento comum sobre os conceitos e variáveis aplicados. Tais definições operacionais fundamentam a interpretação dos resultados e asseguram a reprodutibilidade metodológica do estudo:

Adaptação Climática: Processo de ajuste em sistemas naturais ou humanos em resposta a estímulos climáticos reais ou esperados, ou aos seus efeitos, visando moderar danos ou explorar oportunidades benéficas (IPCC, 2023). No escopo desta pesquisa, a adaptação envolve o fortalecimento da resiliência dos ecossistemas e a redução de vulnerabilidades frente aos impactos climáticos observados no bioma Mata Atlântica, integrando ações de proteção e defesa civil (Brasil, 2012a; Brasil, 2018).

Anomalia: Desvio de uma variável em relação ao seu valor médio estabelecido para um período de referência, indicando variações positivas ou negativas em comparação ao padrão esperado (IPCC, 2021).

Brazil Polyconic (EPSG:5880): Sistema de projeção cartográfica utilizado para o cálculo de áreas no QGIS. É fundamental defini-lo, pois, ao contrário das coordenadas geográficas (graus), este sistema métrico garante que a área calculada em hectares seja precisa para a extensão do território brasileiro (IBGE, 2024b; MapBiomias, 2025).

Calor Sensível vs. Calor Latente: Processos de troca de energia entre a superfície e a atmosfera. O **Calor Sensível** é a energia que resulta no aumento da temperatura do ar (predominante em áreas de pastagem e urbanas), enquanto o **Calor Latente** é a energia utilizada na evapotranspiração (predominante em áreas florestais), atuando como regulador térmico (Gotardo *et al.*, 2019).

Cenários RCP (*Representative Concentration Pathways*): Trajetórias de concentração de gases de efeito estufa adotadas pelo IPCC. O cenário RCP 8.5, citado nesta pesquisa, representa um caminho de altas emissões e ausência de políticas climáticas globais efetivas, servindo como limite superior para a análise de riscos (IPCC, 2021; Vale *et al.*, 2021).

Conectividade: Grau em que a paisagem facilita ou dificulta o movimento de espécies e o fluxo gênico entre remanescentes. É o inverso do isolamento e define a eficácia dos corredores ecológicos na manutenção da biodiversidade e na resiliência climática regional (Ribeiro *et al.*, 2009).

CO₂ equivalente (CO₂eq): Métrica utilizada para comparar o potencial de aquecimento global de diferentes gases de efeito estufa em relação ao dióxido de

carbono, permitindo quantificar o impacto total das emissões ou do sequestro de carbono por remanescentes florestais (IPCC, 2021).

Degradação (Ambiental e Florestal): Processo de perda da integridade biológica, estrutural ou funcional de um ecossistema, sem que ocorra necessariamente a remoção total da cobertura vegetal (desmatamento). No contexto fluminense, manifesta-se principalmente através do efeito de borda em fragmentos isolados e da perda de biomassa em florestas maduras, resultando na diminuição da resiliência climática e da oferta de serviços ecossistêmicos (Ribeiro *et al.*, 2009; Teixeira *et al.*, 2022; MapBiomass, 2026).

Efeito de Borda: Alterações biológicas e físicas (microclimáticas) que ocorrem nas margens de fragmentos florestais que fazem contato com matrizes antrópicas, resultando em maior vulnerabilidade da vegetação nativa a perturbações externas (Teixeira *et al.*, 2022).

Efeito Orográfico: Fenômeno meteorológico em que o relevo (como a Serra do Mar) força a ascensão de massas de ar úmidas, resultando em resfriamento adiabático, condensação e precipitação intensa na encosta voltada para o vento (barlavento) (Arthur; Saffer, 2017).

Estações Meteorológicas Convencionais: Diferenciam-se das automáticas por exigirem a presença de um observador e seguem padrões de medição que garantem a consistência física dos dados em longas janelas temporais (INMET, 2025).

Evapotranspiração: Processo conjunto de transferência de água da superfície para a atmosfera, englobando a evaporação do solo e a transpiração das plantas. É o mecanismo vital de regulação climática assegurada pela cobertura vegetal nativa (Wrege *et al.*, 2015).

Eventos Climáticos Extremos: Episódios raros e intensos de condições meteorológicas ou climáticas, que se desviam dos padrões típicos de uma região. Quando persistem por períodos prolongados, como uma estação, podem ser classificados como eventos climáticos extremos, incluindo exemplos como ondas de calor, secas e chuvas intensas (IPCC, 2021).

Fitofisionomias: Diferentes aspectos da vegetação de uma região (Ex: restingas, manguezais, floresta ombrófila), determinados por fatores climáticos, edáficos (solo) e geológicos (Joly; Metzger; Tabarelli, 2014).

Fragilidade (Ambiental, Ecológica e Institucional): Estado de vulnerabilidade de um sistema (biofísico ou administrativo) frente a pressões externas e distúrbios. Nesta pesquisa, o conceito desdobra-se em três dimensões complementares: (I) **Ambiental**, referente à perda da proteção natural do meio físico (solo e relevo) devido à supressão vegetal; (II) **Ecológica**, referente à redução da resiliência e da biodiversidade dos remanescentes de Mata Atlântica causada pela fragmentação e pelo efeito de borda; e (III) **Institucional**, referente às lacunas na governança, fiscalização e suporte técnico municipal que geram "porosidade legal", permitindo o avanço de ocupações em áreas protegidas e dificultando a otimização de repasses financeiros como o ICMS Ecológico (Girão; Rabelo; Zanella, 2018; Teixeira *et al.*, 2022; Carvalho; Silva; Salvio, 2022).

Fragmentação (Florestal, de Habitats e da Paisagem): Processo de ruptura de áreas originalmente contínuas de vegetação nativa em fragmentos menores e isolados (Ribeiro *et al.*, 2009; Teixeira *et al.*, 2022). Nesta pesquisa, os termos são utilizados de forma complementar para descrever a desestruturação do bioma e o aumento da proporção de bordas, reduzindo a provisão de serviços ambientais.

Hopespot (Ponto de Esperança): Conceito que identifica áreas com elevado potencial de regeneração natural e oportunidades estratégicas para a restauração florestal. Representa a possibilidade de converter o histórico de degradação do bioma Mata Atlântica em um cenário de sustentabilidade e reconexão funcional da paisagem (Rezende *et al.*, 2018).

Hotspot: Conceito aplicado nesta pesquisa sob duas óticas: (I) Biodiversidade, referente a áreas com alto endemismo e elevada perda de habitat original (Myers *et al.*, 2000); e (II) Mudanças Climáticas, referente a regiões que apresentam respostas térmicas e pluviométricas mais intensas que a média global (Giorgi, 2006).

Índice Final de Conservação Ambiental (IFCA): Indicador sintético multidimensional que avalia o desempenho municipal em eixos de conservação (Áreas Protegidas e Mananciais) e saneamento, servindo como parâmetro base para o repasse extrafiscal do ICMS Ecológico (CEPERJ, 2025; Rio de Janeiro, 2019).

Infraestrutura Verde: Rede estrategicamente planejada de áreas naturais e seminaturais (como os remanescentes de Mata Atlântica e APPs) projetada para fornecer serviços ecossistêmicos e resiliência térmica às cidades, funcionando como alternativa às infraestruturas cinza (convencionais) (Ivanova; Randhir; Randhir, 2025).

Isolamento: Grau de separação espacial entre fragmentos de vegetação nativa causada pela presença de uma matriz antrópica. Nesta pesquisa, o termo refere-se à descontinuidade da paisagem que dificulta o fluxo gênico e o deslocamento da fauna (conectividade funcional), aumentando o risco de extinções locais e reduzindo a resiliência dos ecossistemas. O isolamento é um indicador crítico da vulnerabilidade da Mata Atlântica fluminense frente às mudanças climáticas (Ribeiro *et al.*, 2009; Teixeira *et al.*, 2022).

Mosaico de Usos: Classe de cobertura da terra do MapBiomias que integra áreas agrícolas, pastagens e remanescentes florestais onde não é possível a distinção individual na escala de 30 metros (MapBiomias, 2026; Marafon, 2017).

Novas Ruralidades: Reconfiguração do espaço rural caracterizada pela diversificação de usos (turismo, lazer, segundas residências) além da agropecuária tradicional. Esse fenômeno contribui para a fragmentação de grandes monoculturas e surgimento de mosaicos de uso da terra (Marafon, 2017).

Normal Climatológica: Média estatística de variáveis meteorológicas (como temperatura e precipitação) calculada para períodos padronizados de 30 anos. Essas normais são obtidas pelo cálculo das médias de parâmetros meteorológicos, seguindo critérios estabelecidos e recomendados pela Organização Meteorológica Mundial (OMM, 2023).

Outliers: Valores extremos ou anômalos em séries de dados que se desviam significativamente dos padrões estatísticos esperados, podendo refletir tanto erros de medição quanto a ocorrência de eventos raros ou excepcionais (Naghetini; Pinto, 2007).

Overlay (Cruzamento Espacial): Técnica de geoprocessamento que consiste em sobrepor e integrar diferentes camadas de informação geográfica, permitindo a análise conjunta de atributos espaciais distintos. É a ferramenta que possibilita, por

exemplo, identificar a supressão de vegetação em áreas de restrição legal (Souza *et al.*, 2020).

Passivo Ambiental: Conjunto de obrigações e danos ambientais acumulados devido à falta de gestão ou recuperação de ecossistemas degradados (Silva Neto; Ribeiro; Rodrigues, 2024). No contexto desta pesquisa, refere-se ao impacto financeiro e ecológico da supressão persistente em áreas protegidas.

Ponto de Ruptura (*Change-point*): Instante estatisticamente significativo em que ocorre uma alteração brusca no comportamento médio de uma série histórica de dados meteorológicos (Pettitt, 1979).

Pressão Antrópica: Conjunto de ações humanas (como desmatamento, expansão urbana e pecuária extensiva) que exercem força modificadora sobre o meio natural, elevando a vulnerabilidade do território (MapBiomias, 2024; Teixeira *et al.*, 2022).

Regulação Climática: Serviço ecossistêmico prestado pela vegetação nativa que atua no equilíbrio das trocas de calor e umidade entre a superfície e a atmosfera. Manifesta-se através do resfriamento evaporativo e do sombreamento (reduzindo ilhas de calor) e do sequestro de carbono (mitigando o efeito estufa global) (Wrege *et al.*, 2015; Ivanova; Randhir; Randhir, 2025).

Remanescentes Florestais: Porções de vegetação nativa original que persistiram após processos de desmatamento ou conversão do solo. No contexto da Mata Atlântica fluminense, os remanescentes são frequentemente caracterizados por diferentes estágios de sucessão ecológica e pela perda de integridade funcional devido à sua reduzida extensão e exposição ao efeito de borda (SOS Mata Atlântica, 2024; Ribeiro *et al.*, 2009).

Random Forest (Aprendizado de Máquina): Algoritmo de inteligência artificial baseado em múltiplas árvores de decisão. É a tecnologia utilizada pelo MapBiomias para classificar as imagens de satélite e distinguir áreas de floresta de áreas de uso humano (MapBiomias, 2026).

Resiliência Climática: Capacidade de um sistema (urbano ou natural) de absorver distúrbios, recuperar-se de impactos climáticos e adaptar-se para manter suas funções essenciais. No contexto fluminense, a resiliência está diretamente ligada à conectividade dos remanescentes florestais, que funcionam como "amortecedores" contra extremos térmicos e hídricos (Ferreira, 2024; Teixeira *et al.*, 2022).

Resiliência Ecológica: Capacidade de um ecossistema (neste caso, a Mata Atlântica) de retornar ao seu estado original ou manter funções essenciais após um distúrbio. Difere-se do Índice de Resiliência Territorial (IRT) por focar na qualidade biológica e não apenas na métrica de área (Wrege *et al.*, 2015).

Riscos Geoambientais: Probabilidade de ocorrência de danos resultantes da interação entre ameaças naturais (chuvas, deslizamentos) e a vulnerabilidade do território intensificada pela ação humana (Girão; Rabelo; Zanella, 2018).

Soluções Baseadas na Natureza (SbN): Ações inspiradas e apoiadas pela natureza que oferecem simultaneamente benefícios ambientais, sociais e econômicos (Ivanova; Randhir; Randhir, 2025).

Serviços Ecossistêmicos (e Funções Ambientais): As funções ambientais correspondem aos processos naturais e às dinâmicas biológicas e físicas dos ecossistemas, como o ciclo hidrológico e a formação de solos. Quando esses processos geram benefícios diretos ou indiretos para a sobrevivência e o bem-estar humano, como regulação térmica, provisão de água e proteção contra desastres, passa a serem considerados serviços ecossistêmicos ou ambientais (Ferreira, 2024; Wrege *et al.*, 2015).

SIRGAS 2000 (EPSG:4674): Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas. É o datum oficial brasileiro (IBGE, 2024b) e a base cartográfica utilizada neste estudo para garantir a precisão espacial de todos os mapas gerados.

Sumidouro vs. Emissor Líquido: Um ecossistema atua como sumidouro quando a absorção de carbono é superior à sua emissão. Torna-se emissor líquido quando, devido ao estresse e degradação, passa a liberar mais gases de efeito estufa para a atmosfera do que é capaz de sequestrar (Bueno; Valeriano, 2024).

Suscetibilidade (Ambiental/Natural): Predisposição intrínseca do meio físico a processos de degradação ou eventos extremos, resultante de características topográficas, geológicas e climáticas originais, independentemente da intervenção humana. É o "potencial natural" para um evento ocorrer, como a inclinação de uma encosta ou a dinâmica natural de chuvas de uma região (Girão; Rabelo; Zanella, 2018).

Testes Não Paramétricos: Métodos estatísticos que não pressupõem que os dados sigam uma distribuição específica, como a normal (Naghetini; Pinto, 2007).

Turnover (Rotatividade de Cobertura): Processo em que áreas de vegetação nativa são substituídas por regeneração em outros locais. Operacionalmente, caracteriza-se como uma “destruição oculta”, pois há perda de floresta madura acompanhada pelo ganho de vegetação secundária jovem. Embora o balanço quantitativo de cobertura se mantenha, ocorre redução significativa da qualidade ecológica (Rosa *et al.*, 2021).

Vegetação Secundária Jovem: Áreas em estágio inicial de sucessão ecológica que, embora contabilizadas como ganho de cobertura vegetal nativa, ainda não possuem a complexidade estrutural e funcional das florestas maduras em termos de biodiversidade e serviços ecossistêmicos (Chazdon, 2012; MapBiomas, 2026).

Vulnerabilidade (Climática, Ecológica e Socioambiental): Condição de exposição e incapacidade de resposta de um sistema frente a pressões externas. Nesta pesquisa, desdobra-se em três eixos: (I) Climática: refere-se à exposição do território a anomalias térmicas e hídricas e à baixa capacidade de adaptação das infraestruturas urbanas; (II) Ecológica/Vegetação: associada à fragilidade dos remanescentes florestais fragmentados, que perdem sua função protetora; (III) Socioambiental: Condição resultante da interação entre a suscetibilidade natural do meio físico e a fragilidade gerada pelos modelos de ocupação e uso humano do território. Em suma, a vulnerabilidade é o estado em que o risco se materializa devido à falta de resiliência e de instrumentos efetivos de gestão (Girão; Rabelo; Zanella, 2018; Pimenta, 2024).

3. METODOLOGIA

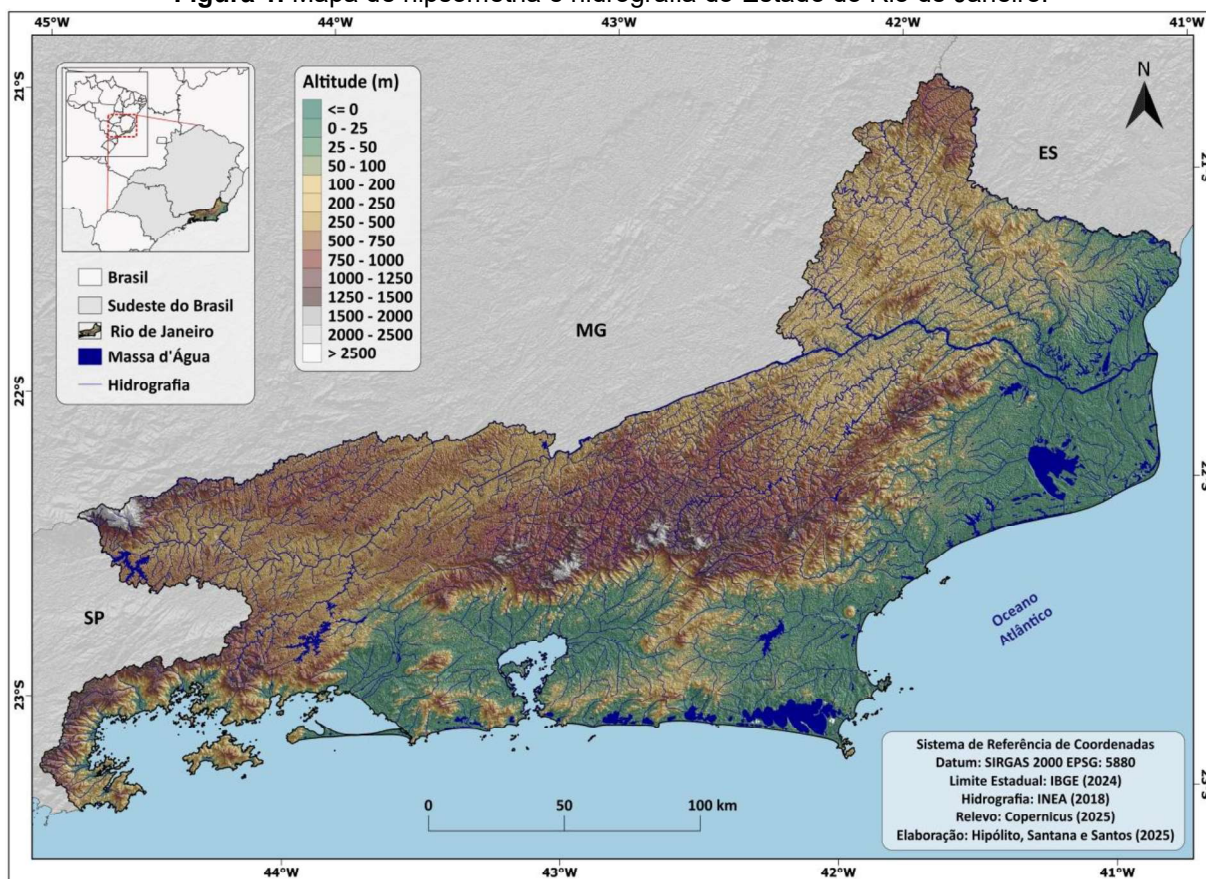
3.1 Caracterização da Área de Estudo

O Estado do Rio de Janeiro, situado na região Sudeste do Brasil, é limitado pelos estados de São Paulo, Minas Gerais e Espírito Santo, e pelo oceano Atlântico. Com uma área de 43.750km² (IBGE, 2024b), é o terceiro menor estado brasileiro, mas abriga cerca de 16,1 milhões de habitantes, aproximadamente 7,9% da população nacional, o que lhe confere a maior densidade demográfica entre os estados brasileiros, sendo superado apenas pela unidade federativa do Distrito Federal (IBGE, 2023).

A geografia do Estado do Rio de Janeiro é marcada por grande diversidade, composta por planícies litorâneas, planaltos e áreas montanhosas que se estendem desde o sul até a porção central do Estado (Luiz-Silva; Oscar-Júnior, 2022). Sua geomorfologia apresenta grande amplitude altimétrica, com regiões próximas ao nível do mar e altitudes superiores a 2.000 metros, inseridas nas Serras do Mar e da Mantiqueira, resultado da interação complexa de fatores geológicos e climáticos ao longo do tempo (Girão *et al.*, 2022; Dantas; Ferreira; Shinzato, 2023).

A Figura 1 apresenta o mapa hipsométrico e hidrográfico do Estado do Rio de Janeiro, evidenciando a acentuada heterogeneidade do relevo. As Serras do Mar e da Mantiqueira concentram os maiores valores de elevação, enquanto as regiões litorâneas e de baixada predominam em altitudes mais baixas. Os setores serranos, por sua vez, apresentam altitudes superiores a 1.000 metros, reforçando a complexidade geomorfológica do território fluminense. Essa amplitude altimétrica, marcada pelo predomínio de áreas de encosta e pela presença do extenso complexo serrano, exerce influência direta sobre a dinâmica climática e ambiental, aumentando a suscetibilidade a movimentos de massa e inundações.

Figura 1. Mapa de hipsometria e hidrografia do Estado do Rio de Janeiro.



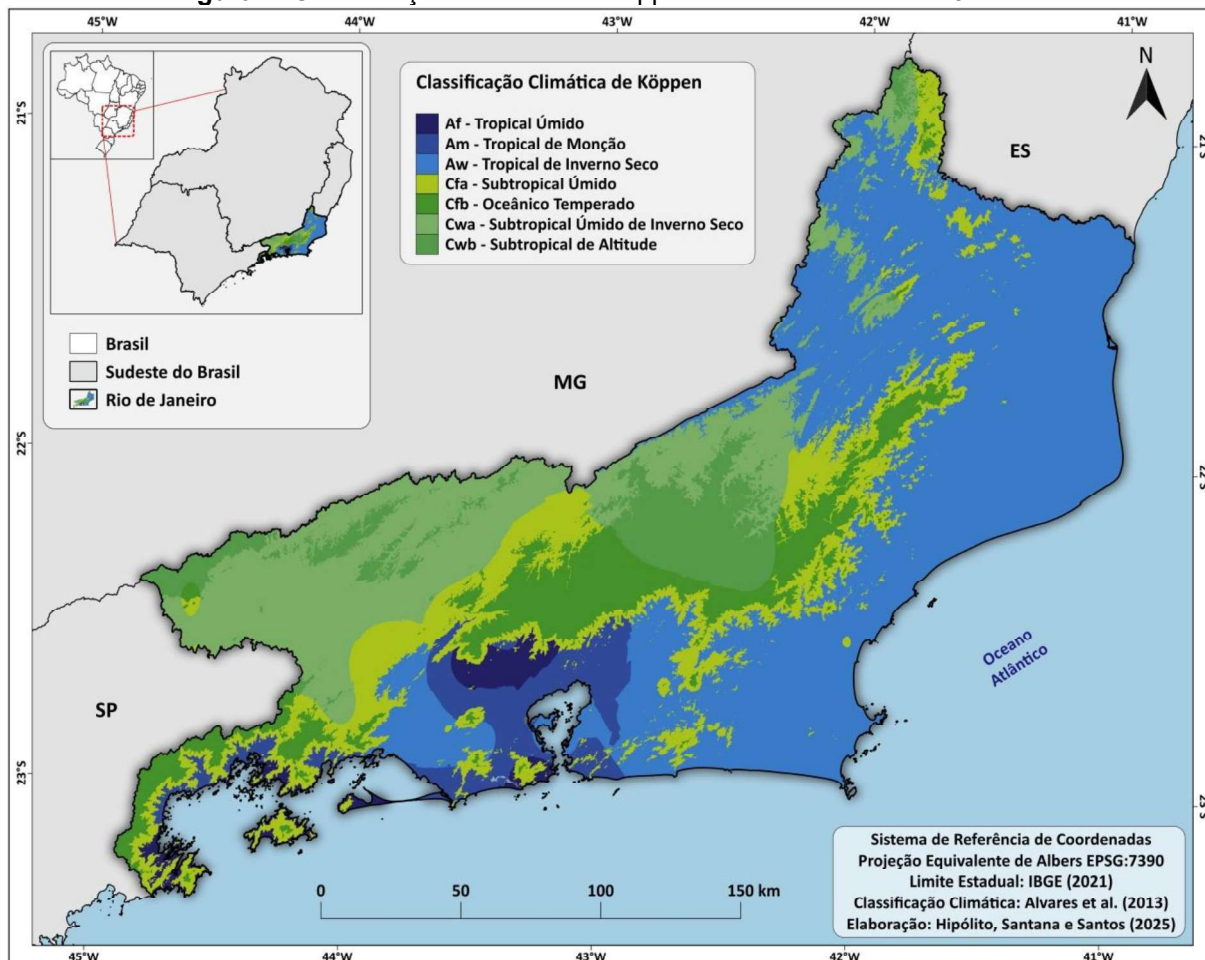
Fonte: Elaboração própria (2025).

A diversidade geomorfológica reflete-se também na climatologia, uma vez que o relevo acidentado estimula a precipitação orográfica e gera contrastes térmicos (Luiz-Silva; Oscar-Júnior, 2022). Nesse contexto, a Classificação Climática de Köppen, ilustrada na Figura 2, é utilizada para mapear essa ampla variabilidade, revelando um padrão de distribuição intimamente ligado à altitude (Alvares *et al.*, 2013).

Conforme ilustrado na Figura 2, o clima Tropical com Inverno Seco (Aw) é o tipo dominante no Estado do Rio de Janeiro, estendendo-se por 44,1% do território fluminense (Alvares *et al.*, 2013) em altitudes que não ultrapassam 250-300 metros. Esse domínio tropical é encontrado em toda a costa norte e noroeste do Estado, alcançando regiões como a Região dos Lagos (até Arraial do Cabo), onde a precipitação anual é inferior a 1.000 mm (Alvares *et al.*, 2013). Adicionalmente, o clima Tropical Úmido (Af) e Tropical de Monção (Am) ocorre em áreas muito pequenas, localizadas na capital, Niterói e ao longo da Baía de Guanabara. Nessas áreas de baixada e litoral, as médias de temperatura mínima variam de 17°C a

18,5°C no inverno os períodos de estiagem são mais curtos devido à constante influência da umidade oceânica (Alvares *et al.*, 2013; Silva; Dereczynski, 2014).

Figura 2. Classificação climática de Köppen no Estado do Rio de Janeiro.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Nas áreas serranas, predominam os climas de altitude. Segundo Alvares *et al.* (2013), o clima Subtropical de Altitude (Cwb) ocorre especificamente margeando o limite com Minas Gerais, em cotas superiores a 650 metros. Já o Oceânico Temperado (Cfb) possui maior abrangência, ocupando 9,4% do território estadual. Este último é encontrado em pontos culminantes, como no Parque Nacional da Serra dos Órgãos, aonde, em altitudes acima de 2.100 metros, a temperatura média anual chega a ser inferior a 12°C (Alvares *et al.*, 2013; Silva; Dereczynski, 2014).

Essa acentuada diferença na distribuição de temperatura e pluviosidade, estruturada pelas categorias climáticas, constitui um fator fundamental de suscetibilidade natural do território. Quando esses condicionantes físicos (como a concentração de chuvas em áreas de encosta) interagem com modelos de ocupação

inadequados, o cenário de suscetibilidade é convertido em vulnerabilidade socioambiental, elevando o risco de movimentos de massa e inundações (Rio de Janeiro, 2018).

O Estado do Rio de Janeiro situa-se integralmente nos domínios do bioma Mata Atlântica (Coelho *et al.*, 2017). Embora a cobertura florestal contínua tenha sido fragmentada pelo processo histórico de ocupação, o estado permanece como o único do país cujo território está totalmente contido nessa província fitogeográfica. Trata-se de uma unidade espacial em que as condições de solo, relevo e clima favorecem naturalmente o desenvolvimento desse ecossistema, independentemente do uso atual da terra. Essa configuração é essencial para o ciclo hidrológico e para a regulação climática regional, processos assegurados pela evapotranspiração da vegetação nativa (Wrege *et al.*, 2015; Luiz-Silva; Oscar-Júnior, 2022).

O bioma apresenta uma rica biodiversidade moldada por flutuações climáticas do Quaternário, com destaque para a estabilidade alcançada durante o Holoceno, nos últimos 11.700 anos. Esse longo processo evolutivo favoreceu elevado endemismo, tornando o estado uma das áreas de maior importância biológica do país (Campanili; Prochnow, 2006). Atualmente, os remanescentes florestais concentram-se em encostas íngremes e topos de morros, áreas de difícil ocupação que funcionam como refúgios naturais (Wrege *et al.*, 2015).

O monitoramento mais recente do bioma indica que o Estado do Rio de Janeiro possui 821.087 hectares de remanescentes de Mata Atlântica, o que corresponde a 18,8% de sua área total. No ciclo 2022-2023, o estado registrou uma redução de 71% no desmatamento em relação ao período anterior, totalizando a perda de 70 hectares de mata nativa, valor inferior aos 243 hectares suprimidos entre 2021 e 2022 (Fundação SOS Mata Atlântica; INPE, 2024).

A conservação e a restauração desse bioma são essenciais não apenas para a biodiversidade, mas para a mitigação de riscos ambientais (Brasil, 2018; Nobre *et al.*, 2007). O litoral extenso e a complexa rede hidrográfica, composta por nove regiões hidrográficas, com destaque para o rio Paraíba do Sul (INEA, 2013), tornam a proteção das matas ciliares e de encosta uma medida técnica necessária. Apesar da relação direta entre a cobertura vegetal e a prevenção de enchentes e deslizamentos, a limitada alocação de recursos tem restringido a efetividade das políticas de gestão. Conforme discutido por Young, Aguiar e Possas (2014), as perdas econômicas recorrentes de desastres climáticos reforçam a necessidade

estratégica de priorizar investimentos em prevenção, como o monitoramento constante e a realocação planejada de comunidades em áreas de risco.

3.2 Dinâmica do Uso da Terra e Processos de Ocupação Territorial

Neste estudo, todo processamento cartográfico foi realizado no software QGIS (versão 3.10). Na etapa inicial, os dados vetoriais e matriciais foram padronizados no Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000), seguindo o padrão oficial brasileiro (código EPSG:4674). Para garantir maior precisão nos cálculos de áreas e métricas espaciais, os dados foram posteriormente reprojatados para o sistema de coordenadas SIRGAS 2000 / Brazil Polyconic (EPSG:5880). Esse procedimento foi realizado antes do recorte para os limites estaduais, utilizando bases oficiais do IBGE e INEA para delimitação territorial e hidrográfica.

A análise espacial baseou-se nos dados anuais de cobertura e uso da terra disponibilizados pelo Projeto MapBiomás (Coleção 10), que abrange o período de 1985 a 2024 com resolução espacial de 30 metros. Essa coleção é resultado de uma iniciativa multi-institucional de monitoramento constante, cujos mapas são gerados a partir do processamento pixel a pixel de imagens da série histórica Landsat. Conforme descrito no Documento de Base Teórica do Algoritmo da coleção (MapBiomás, 2026), o método utiliza a plataforma Google Earth Engine, uma infraestrutura de computação em nuvem que permite o processamento de grandes volumes de dados geoespaciais em escala global, e algoritmos de aprendizado de máquina (*Machine Learning*), especificamente o *Random Forest*. Este modelo estatístico é treinado para classificar padrões espectrais nos pixels das imagens Landsat, garantindo maior precisão na identificação das transições de uso da terra e na distinção entre classes de vegetação nativa e áreas antrópicas ao longo da série histórica.

Para assegurar a consistência da série temporal e a definição precisa das trajetórias entre vegetação nativa e uso antrópico, os dados da Coleção 10 incorporam filtros de pós-classificação aplicados originalmente pelo projeto MapBiomás (Souza *et al.*, 2020; MapBiomás, 2026). Nesta classificação, a classe de vegetação nativa agrega as fisionomias naturais de florestas, formações savânicas e campestres, enquanto o uso antrópico consolida as áreas de pastagem, agricultura,

silvicultura e zonas urbanizadas. Os critérios utilizados nesta etapa basearam-se em filtros espaciais (para remoção de pixels isolados), filtros de frequência (para reduzir oscilações temporais e falsos positivos) e filtros temporais de persistência. Estes últimos utilizam janelas móveis (de 3 a 5 anos) para identificar e corrigir transições logicamente impossíveis ou espúrias, garantindo que mudanças de classe sejam mantidas apenas quando confirmadas cronologicamente (Souza *et al.*, 2020). Como resultado, essa etapa gerou uma série histórica estabilizada, mitigando ruídos espectrais e erros de classificação pontuais entre os anos.

A primeira etapa da análise consistiu no mapeamento da evolução das classes entre 1985 e 2024, período escolhido para identificar tendências consolidadas de alteração da paisagem. Para compreender a dinâmica dessas mudanças, foi também analisada a transição de uso e cobertura da terra delimitando o período de 1985 a 2023. Esta escolha justifica-se pelo protocolo de validação dos filtros temporais do MapBiomas, que exige uma janela de observação de anos subsequentes para confirmar eventos de mudança estável; dessa forma, o ano de 2023 representa o limite mais recente com dados consolidados para o cálculo de transições permanentes de uso e cobertura, evitando a contabilização de variações sazonais ou preliminares do último ano da série (2024) (MapBiomas, 2026).

A partir desse processamento, identificaram-se áreas de persistência e conversão entre classes, as quais foram sintetizadas e agrupadas nesta pesquisa em três categorias analíticas de modo a facilitar a interpretação: (I) Indicadores de conservação, representados pela estabilidade de remanescentes e pelo ganho de vegetação secundária; (II) Indicadores de pressão, onde a perda de vegetação para uso agrícola marca o desmatamento consolidado e a "pressão urbana" mapeia a expansão da infraestrutura; e (III) Dinâmica de usos antrópicos, englobando a alternância entre pastagens e agricultura. Essa categorização permitiu converter as classes brutas do MapBiomas em indicadores de processos territoriais, fundamentando a análise dos vetores de degradação discutidos nos resultados.

Na sequência, para quantificar o cenário mais recente, utilizou-se o módulo específico de "desmatamento e vegetação secundária" do Projeto MapBiomas (2025). A extração dos valores absolutos de supressão foi realizada via estatística zonal no software QGIS, seguindo o protocolo de processamento descrito por Souza *et al.* (2020). Os dados matriciais foram convertidos para área em hectares considerando a resolução espacial do sensor Landsat (30m x 30m), onde cada pixel

corresponde a 0,09 hectares. Para garantir a precisão dessa conversão, a camada foi processada no Sistema de Referência de Coordenadas SIRGAS 2000 / Brazil Polyconic (EPSG:5880), sistema métrico que valida a relação direta entre a dimensão do pixel e a área calculada, conforme a base teórica estabelecida pelo MapBiomias (2025). O cálculo é apresentado na Equação 1:

$$\text{Área (ha)} = \frac{\text{Contagem de Pixels} \times 900}{10.000} \quad (1)$$

Para interpretar a relação entre perda e ganho de vegetação nativa, foi utilizado o Índice de Resiliência Territorial (IRT). A delimitação do recorte temporal para esse indicador justifica-se pelo rigor metodológico do módulo de 'supressão e recuperação' do MapBiomias. Conforme os fundamentos teóricos do algoritmo (Souza *et al.*, 2020; MapBiomias, 2026), a validação de eventos de regeneração exige uma janela de confirmação de dois anos (t+1 e t+2); assim, 2023 consolidou-se como o período mais recente com dados fidedignos para o cruzamento simultâneo de perdas e ganhos.

O IRT baseia-se no cálculo de balanço líquido de mudança de cobertura, fundamentado na metodologia de matrizes de transição proposta por Souza *et al.* (2020). Esse índice estabelece a razão entre a capacidade de regeneração da paisagem (áreas em recuperação) e a pressão de desmatamento (áreas de supressão), permitindo avaliar o balanço dinâmico da cobertura vegetal frente às pressões antrópicas, conforme a Equação 2:

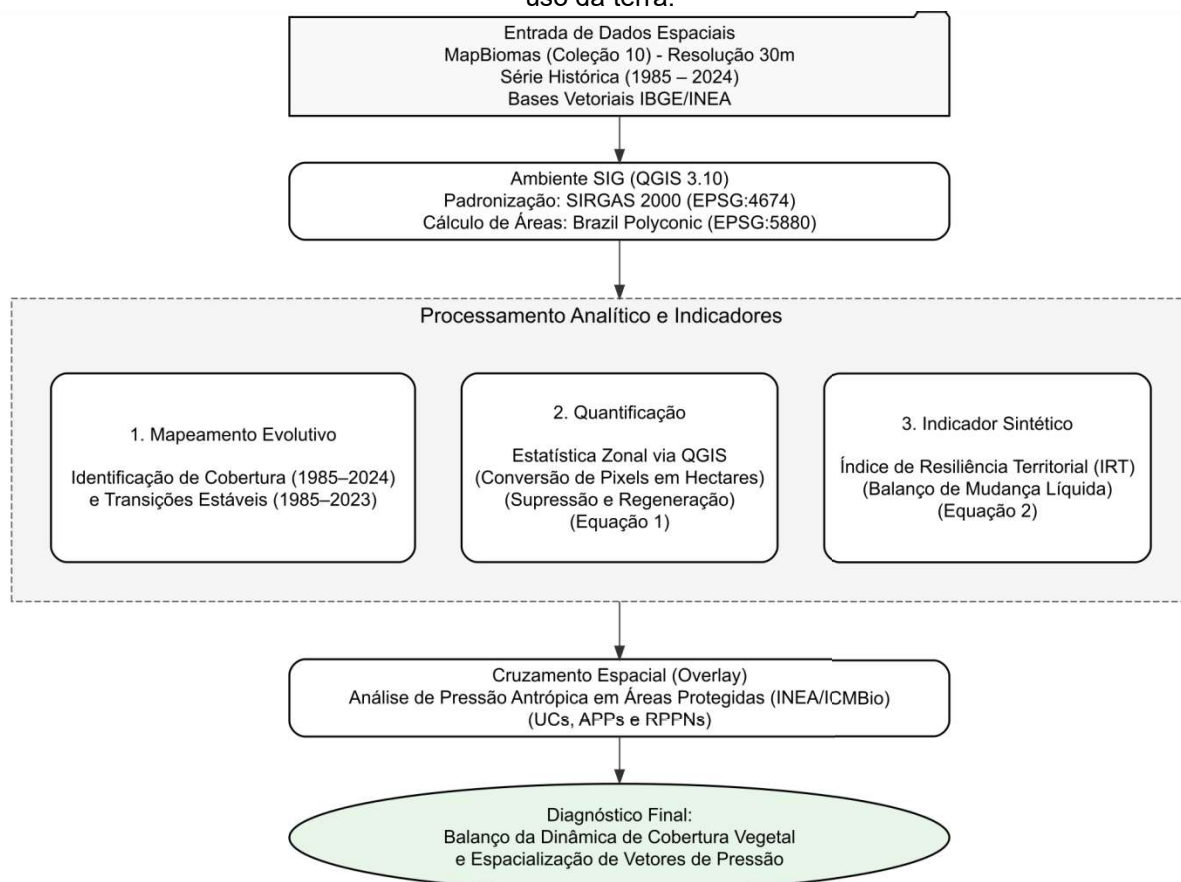
$$IRT = \frac{\text{Área Recuperada}}{\text{Área Suprimida}} \quad (2)$$

A interpretação do índice permite diagnosticar o equilíbrio ambiental da região analisada a partir da relação entre os vetores de ganho e perda de vegetação. Valores superiores a 1 ($IRT > 1$) indicam um cenário de superávit de resiliência, onde a área recuperada supera a área desmatada, caracterizando uma regeneração ativa. Por outro lado, um resultado igual a 1 ($IRT = 1$) aponta para uma situação de equilíbrio. Já valores inferiores a 1 ($IRT < 1$) demonstram um déficit de resiliência, evidenciando que a supressão de vegetação avança em velocidade superior à

capacidade de regeneração do território no recorte temporal analisado. Por fim, realizou-se a sobreposição espacial (overlay) entre os dados de dinâmica da cobertura vegetal (remanescentes, supressão e regeneração) e os limites oficiais das Áreas Protegidas. Foram consideradas as UCs (de Proteção Integral e Uso Sustentável), as Reservas Particulares do Patrimônio Natural (RPPN) e as Áreas de Preservação Permanente (APP), visando identificar a pressão antrópica incidente sobre esses espaços legalmente instituídos.

A Figura 3 apresenta o fluxograma metodológico referente ao processamento de dados espaciais e à análise da dinâmica do uso da terra. O fluxo inicia-se na normalização cartográfica, avança para o processamento matricial que alimenta as equações de área e o cálculo do IRT, e culmina na espacialização das pressões antrópicas sobre as zonas legalmente protegidas.

Figura 3. Fluxograma metodológico do processamento de dados espaciais e análise da dinâmica do uso da terra.



Fonte: Elaboração própria (2025).

3.3 Dados Meteorológicos Observados

Para a realização deste estudo, foram utilizados dados diários de temperatura máxima e mínima e precipitação, disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2025). A etapa inicial consistiu na seleção e triagem das estações meteorológicas convencionais localizadas no Estado do Rio de Janeiro, priorizando aquelas com séries históricas contínuas e de maior confiabilidade. Optou-se por não utilizar dados provenientes das estações automáticas, uma vez que estas não apresentam séries temporais suficientemente longas para análises climatológicas robustas. Além disso, deu-se preferência ao uso de dados observados, em vez de estimativas provenientes de modelos ou reanálises, assegurando maior fidedignidade e melhor representação das condições climáticas efetivamente registradas na região.

Do conjunto inicial de 56 estações meteorológicas convencionais distribuídas pelo território fluminense, foram selecionadas seis unidades que atenderam ao critério de apresentar até 20% de falhas nas três variáveis analisadas (temperatura máxima, temperatura mínima e precipitação). No caso da variável precipitação, o processamento diferenciou as falhas de registro (dados ausentes) dos eventos de precipitação nula (0,0 mm). Assim, o limite de 20% de falhas foi aplicado exclusivamente aos dias em que não houve qualquer registro de medição, garantindo a correta distinção entre ausência de dados e ocorrência de dias sem chuva.

O período considerado para a seleção foi de 01/01/1972 a 31/12/2025, resultando em uma série temporal de 54 anos. Esse recorte temporal e o limite para falhas foram estabelecidos para equilibrar abrangência e confiabilidade dos dados, assegurando maior robustez na identificação de tendências e sinais de mudança climática. As informações referentes a essas estações são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Estações meteorológicas selecionadas e suas principais informações.

	Alto da Boa Vista (Código 83007)	Itaperuna (Código 83695)	Santa Maria Madalena (Código 83696)	Campos (Código 83698)	Cordeiro (Código 83718)	Resende (Código 83738)
Latitude	22°57'57"S	21°12'16"S	21°58'05"S	21°44'33"S	22°01'20"S	22°27'04"S
Longitude	43°16'45"W	41°54'20"W	42°00'11"W	41°19'58"W	42°21'52"W	44°26'41"W
Altitude (m)	366 m	123,6 m	640 m	11,2 m	505,9 m	439,9 m
Data Início	31/05/1966	01/01/1960	01/01/1960	01/01/1960	15/07/1971	01/01/1960
Período Selecionado	01/01/1972 a 31/12/2025	01/01/1972 a 31/12/2025	01/01/1972 a 31/12/2025	01/01/1972 a 31/12/2025	01/01/1972 a 31/12/2025	01/01/1972 a 31/12/2025
Falhas (%) Precipitação (1972–2025)	7,8%	14,8%	16,1%	19,3%	18,6%	20,2%
Falhas (%) Temperatura Máxima (1972–2025)	7,9%	16,1%	20,0%	5,9%	6,2%	8,9%
Falhas (%) Temperatura Mínima (1972–2025)	7,7%	15,6%	16,3%	5,6%	5,9%	7,7%

Fonte: Elaboração própria com dados do INMET (2025).

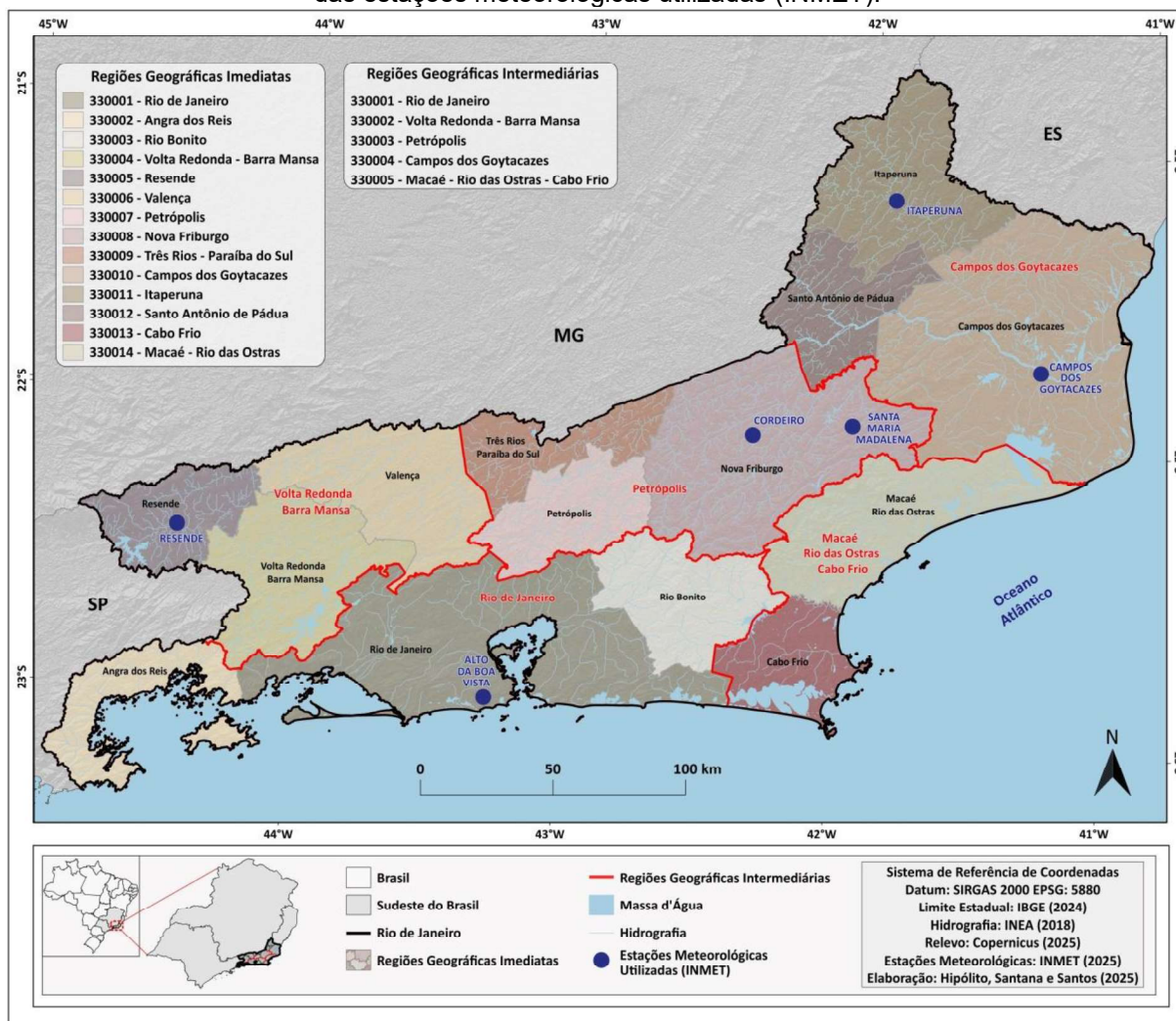
O processamento dos dados brutos, a identificação de lacunas e a organização das séries temporais foram realizados em ambiente computacional utilizando a Linguagem de Programação R (R Core Team, 2025), com auxílio da interface RStudio (versão 2025.05.1+513).

A Figura 4 ilustra a localização das seis estações meteorológicas utilizadas no estudo, bem como as Regiões Geográficas Imediatas (RGI) e Intermediárias do Estado do Rio de Janeiro. A opção por esse recorte regional justifica-se pela natureza da governança ambiental brasileira, que é estruturada sobre a base municipal e seus polos de influência. Fundamentada no conceito de território-rede (IBGE, 2017), essa abordagem permite associar os fenômenos climáticos extremos

à estrutura de gestão e aos fluxos socioeconômicos dos polos urbanos, superando divisões puramente fisiográficas.

Uma vez que as estratégias de adaptação e a implementação de políticas públicas dependem diretamente da capacidade institucional das redes de cidades, a regionalização proposta pelo IBGE oferece um panorama mais preciso para a análise da vulnerabilidade institucional. Nesse contexto, evidencia-se que a escassez de dados observados em áreas de elevada suscetibilidade constitui, por si só, um desafio adicional à governança ambiental.

Figura 4. Regiões geográficas imediatas e intermediárias do Estado do Rio de Janeiro e distribuição das estações meteorológicas utilizadas (INMET).



Fonte: Elaboração própria (2025)

A inserção das estações em diferentes contextos regionais, evidenciada na Figura 4, reforça a importância da análise sob a ótica das RGIs por estas unidades representarem os distintos domínios socioambientais do Estado. Enquanto a RGI

Rio de Janeiro concentra a maior densidade demográfica e pressão urbana sobre o bioma, a RGI Campos dos Goytacazes destaca-se pelas extensas planícies costeiras e atividade petrolífera, ao passo que a RGI Macaé-Rio das Ostras reflete o crescimento acelerado na interface serra-mar. Complementarmente, as RGIs de Petrópolis e Volta Redonda abrangem, respectivamente, os ecossistemas de altitude e o polo industrial do Médio Paraíba (IBGE, 2017; Rio de Janeiro, 2018; Luiz-Silva; Oscar-Júnior, 2022). Essa estrutura possibilita relacionar os dados meteorológicos às dinâmicas socioespaciais de cada porção do território, favorecendo uma interpretação integrada dos padrões de temperatura e precipitação e a complexidade funcional necessária ao planejamento e à mitigação de impactos climáticos.

3.4 Análise Descritiva e de Tendência das Variáveis Climáticas

Os eventos extremos de temperatura e precipitação foram identificados a partir dos valores máximos anuais de cada variável, correspondentes aos registros mais elevados obtidos em cada ano e estação com base nos dados diários. Essa abordagem permitiu mensurar a intensidade dos eventos e construir séries temporais de extremos específicas para cada localidade, fornecendo uma base consistente para a análise de tendências e da variabilidade climática.

Para analisar possíveis mudanças significativas nos padrões climáticos entre 1972 e 2025, foram empregados testes estatísticos não paramétricos, escolhidos em função das características das variáveis hidrometeorológicas. Essas variáveis apresentam distribuições assimétricas e elevada ocorrência de valores extremos (outliers), fatores que comprometem a validade da hipótese de normalidade da distribuição (Naghetini; Pinto, 2007). Aplicou-se o teste de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) para detecção de tendências significativas, seguindo as diretrizes da Organização Meteorológica Mundial (Sneyers, 1990), combinado ao estimador de declive de Sen (Sen's Slope), que quantifica a taxa de mudança, e ao teste de Pettitt (1979) para identificar pontos de rupturas nas séries temporais. Essa abordagem conjunta permite avaliar a significância da mudança e identificar o ano em que ocorreu a alteração no comportamento central das séries.

Vale destacar que, embora a literatura aponte que testes como o SNHT ou o de Buishand possam apresentar maior sensibilidade a variações nos extremos, a escolha pelo teste de Pettitt se justifica por sua natureza não paramétrica,

garantindo a consistência metodológica em relação aos demais procedimentos adotados nesta pesquisa. Ressalta-se ainda que esse teste é amplamente aceito em estudos hidroclimatológicos regionais (Penereiro; Martins; Beretta, 2016).

No teste de Mann-Kendall, a hipótese nula (H_0) assume que a série é independente e identicamente distribuída (sem tendência), enquanto a hipótese alternativa (H_1) indica a existência de uma tendência monotônica (Mann, 1945; Kendall, 1975). A estatística do teste S é calculada pela soma dos sinais das diferenças entre pares de valores observados, conforme a Equação 3:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (3)$$

onde n é o número de observações da série, x_j e x_k são os valores sequenciais dos dados e a função sinal (sgn) (Equação 4) é dada por:

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1, & \text{se } (x_j - x_k) > 0 \\ 0, & \text{se } (x_j - x_k) = 0 \\ -1, & \text{se } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Para séries temporais com $n > 10$, a estatística S aproxima-se de uma distribuição normal. A variância de S , denotada por $\text{Var}(S)$, é calculada considerando a correção para grupos de valores iguais, conforme a Equação 5 (Kendall, 1975):

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^p t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (5)$$

onde n é o número total de observações; p é o número de grupos com valores repetidos (empates); e t_i é o número de dados iguais no grupo p .

A estatística padronizada do teste (Z_{MK}) é então obtida pela Equação 6:

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{se } S > 0 \\ 0, & \text{se } S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (6)$$

A tendência é considerada estatisticamente significativa quando o valor absoluto de Z_{MK} é superior ao valor crítico da distribuição normal padrão para um nível de significância de $\alpha = 0,05$ (95% de confiança), ou seja, $|Z_{MK}| > |1,96|$. Um valor positivo de Z_{MK} indica tendência de aumento, enquanto um valor negativo indica diminuição.

Para estimar a magnitude da tendência, foi utilizado o estimador de declive de Sen (Sen's Slope), que quantifica a taxa de mudança. Diferente dos métodos de regressão linear simples, que podem ter sua inclinação distorcida por eventos extremos (*outliers*), este método baseia-se na mediana de todas as inclinações calculada entre os pares de observações da série histórica (Sen, 1968). Essa característica confere ao teste maior robustez, assegurando que a taxa de variação reflita o comportamento central dos dados sem a interferência de valores acentuados pontuais. A estimativa (β) é obtida conforme apresentado na Equação 7:

$$\beta = \text{Mediana} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad (7)$$

onde β é a estimativa da inclinação de Sen, que representa a magnitude da tendência (taxa de variação por unidade de tempo); e x_j e x_i são os valores dos dados nos tempos j e i , respectivamente, sendo $j > i$.

De forma complementar, para identificar o momento em que ocorreram alterações no comportamento das séries, aplicou-se o teste de Pettitt (Pettitt, 1979). Este é um método não paramétrico desenvolvido para detectar um ponto de mudança (change-point) ou ruptura abrupta na média de uma série temporal.

O teste de Pettitt verifica a hipótese nula (H_0) de que não há mudança na série (os dados são homogêneos) contra a hipótese alternativa (H_1) de que existe um ponto de ruptura no tempo t (onde $1 \leq t < n$). A estatística do teste, U_k , é

calculada iterativamente para todos os possíveis pontos de mudança k (de 1 a n), conforme a Equação 8:

$$U_k = 2 \sum_{i=1}^k r_i - k(n + 1) \quad (8)$$

onde r_i é o posto (rank) da i -ésima observação quando os valores da série são ordenados de forma crescente; e k representa o ano candidato à ruptura.

O ponto de ruptura mais provável (K) corresponde ao momento em que o valor absoluto de U_k atinge seu máximo, conforme a Equação 9:

$$K = \max_{1 \leq k < n} |U_k| \quad (9)$$

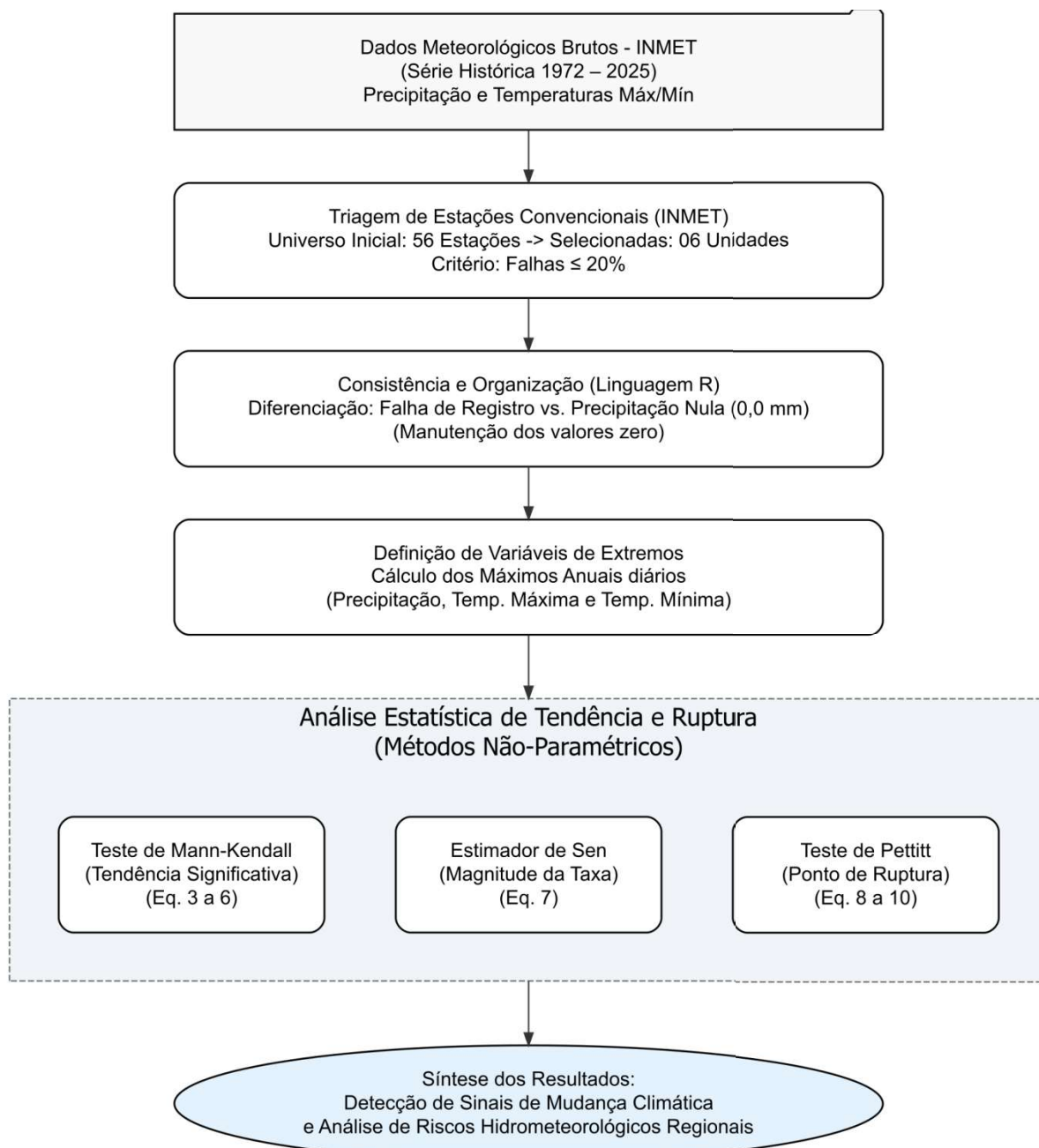
A significância estatística desse ponto de mudança é avaliada por meio do cálculo da probabilidade (p), aproximada pela Equação 10:

$$p \cong 2 \exp\left(\frac{-6K^2}{n^3 + n^2}\right) \quad (10)$$

Se o valor de p for menor que o nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$), rejeita-se a hipótese nula, confirmando que houve uma ruptura significativa na série temporal no ano indicado por K .

O delineamento das etapas estatísticas, desde a triagem dos dados até a aplicação dos testes de tendência e ruptura, está sintetizado na Figura 5.

Figura 5. Fluxograma do tratamento de dados climáticos e aplicação dos testes estatísticos de tendência e ruptura.



Fonte: Elaboração própria (2025).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Dinâmica do Uso da Terra e Processos de Ocupação Territorial

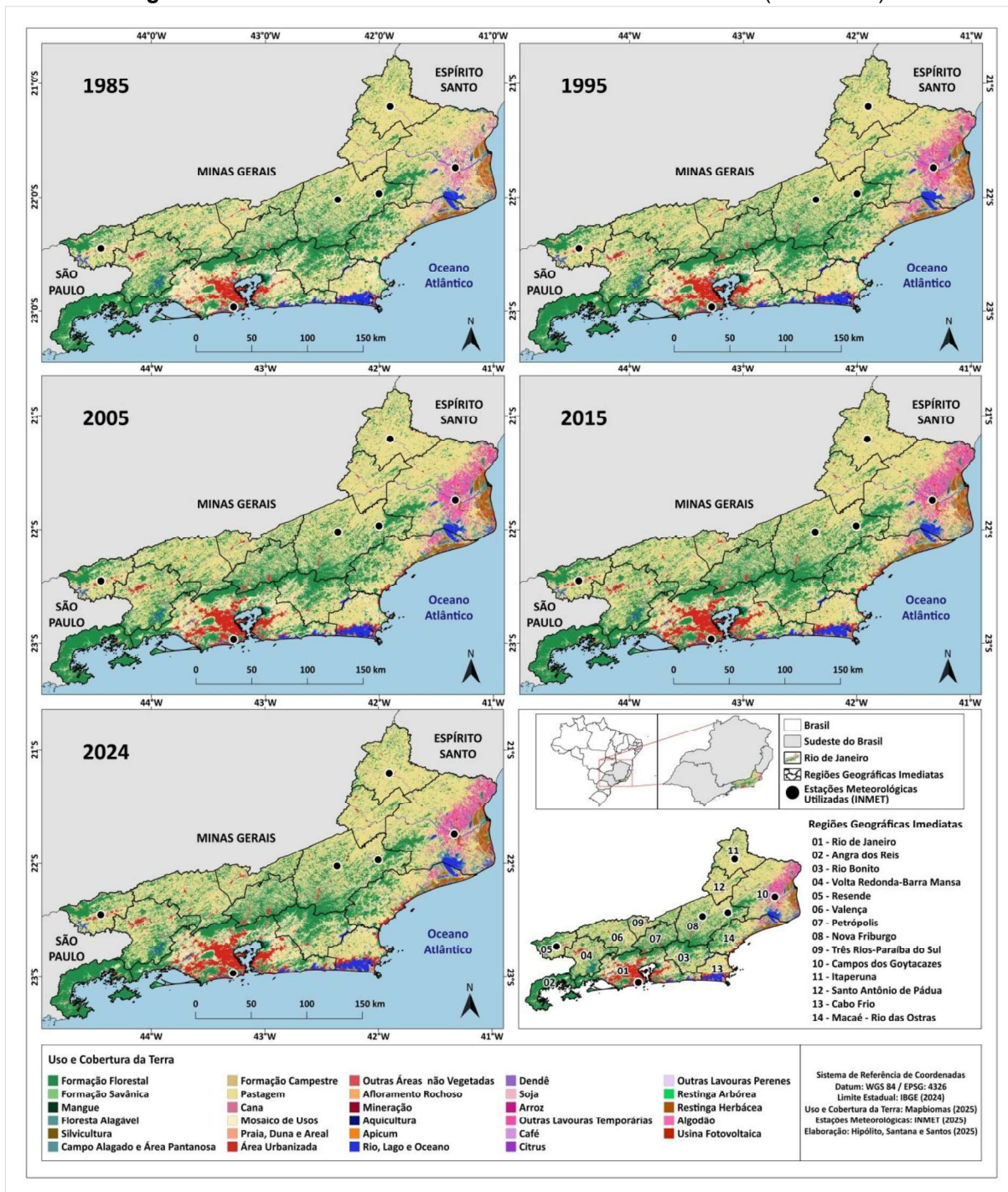
A análise da evolução espaço-temporal do uso e cobertura da terra no Estado do Rio de Janeiro (1985–2024) revela um cenário de consolidação das atividades antrópicas e de fragmentação dos ecossistemas nativos. Neste período de 39 anos, a ocupação do território fluminense passou por mudanças estruturais profundas, marcadas pelo avanço da urbanização e pela hegemonia da agropecuária, que juntas dominam a matriz do solo. A Figura 6 ilustra a distribuição espacial das diferentes classes de uso, evidenciando uma configuração territorial marcada por contrastes associados ao relevo. Nas baixadas litorâneas, observa-se a expansão urbana contínua, especialmente ao longo dos eixos metropolitanos das RGI de Rio de Janeiro (RGI 01), Cabo Frio (RGI 13) e Macaé (RGI 14), avançando sobre ecossistemas costeiros de elevada fragilidade ambiental. Em contraposição, o interior do estado mantém uma matriz predominantemente agropecuária, estruturada pela presença de pastagens e mosaicos de uso.

Esse padrão espacial reforça a dualidade entre a urbanização acelerada nas zonas costeiras e a predominância das atividades agropecuárias no interior. Em termos quantitativos, apresentada na Figura 7, essa dinâmica é corroborada pelo crescimento de 78,1% da mancha urbana no estado entre 1985 e 2024 (saltando de 3,2% para 5,7% da área total), enquanto a matriz do interior permanece consolidada pela pastagem, que em 2024 ainda ocupava 39,2% do território fluminense. Tal configuração estabelece um cenário de crescente fragmentação da paisagem e de desafios para a conservação dos remanescentes florestais e para o planejamento territorial sustentável.

A formação florestal mantém relativa resistência, concentrando-se principalmente nos maciços serranos (RGIs 07 e 08) e áreas de alta declividade. Essa configuração espacial reforça a análise de Marafon (2017), que aponta o relevo acidentado das regiões serranas como um limitador histórico à mecanização agrícola e à expansão urbana, atuando como uma barreira física à conversão do solo. No entanto, os resultados deste estudo evidenciam que, embora as serras funcionem como refúgios topográficos, as áreas de baixada e encostas suaves foram sistematicamente convertidas. Esse processo isolou os fragmentos florestais

em “ilhas” cercadas por uma matriz antrópica, reforçando o diagnóstico de fragmentação descrito classicamente por Ribeiro *et al.* (2009).

Figura 6. Cobertura e uso da terra no Estado do Rio de Janeiro (1985-2024).

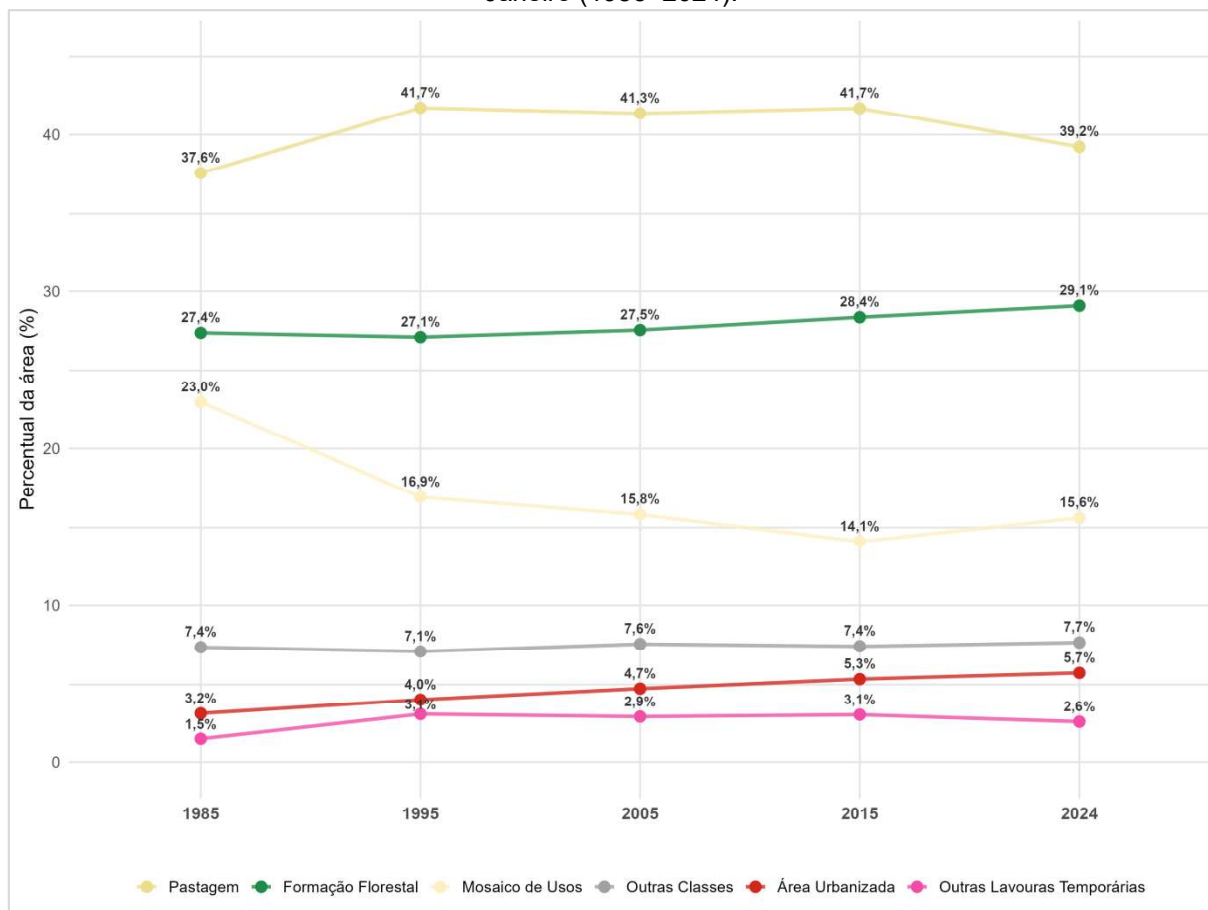


Fonte: Elaboração própria (2025).

Para compreender a magnitude dessas alterações ao longo das últimas décadas, a Figura 7 apresenta a evolução temporal das áreas por categorias de uso e cobertura da terra em termos percentuais. Com o intuito de destacar as dinâmicas

estruturantes da paisagem, as categorias de baixa expressividade territorial ou ocorrência pontual na área de estudo (como Corpos d'água e Afloramentos Rochosos) foram agrupadas sob a denominação 'Outras Classes'.

Figura 7. Evolução temporal das principais classes de uso e cobertura da terra no Estado do Rio de Janeiro (1985–2024).



Fonte: Elaboração própria com base nos dados do MapBiomias (Coleção 10), 2025.

A evolução temporal das principais classes de uso e cobertura da terra evidencia dinâmicas distintas. Ressalta-se a ascensão contínua da urbanização ao longo dos 39 anos, sem recuos, confirmando a concentração costeira já espacializada na Figura 6. Esse processo converge com os resultados de Nhantumbo *et al.* (2025) para o Município do Rio de Janeiro (2000-2023), reforçando a pressão persistente do tecido urbano sobre áreas rurais e periurbanas.

Em contrapartida, a dinâmica rural revela movimentos mais complexos. De acordo com Marafon (2017), em uma perspectiva de longo prazo (1985–2015), consolidou-se a hegemonia da classe Pastagem em detrimento do Mosaico de Usos, que sofreu uma retração drástica no mesmo período, refletindo o ciclo

histórico de pecuarização extensiva. Já no período mais recente (2015–2024), ilustrado na Figura 7, os dados apontam uma inflexão: observa-se uma estagnação e leve retração da pastagem (de 41,7% para 39,2%), simultânea à recuperação da classe de Mosaico de Usos (de 14,1% para 15,6%) e a leve recuperação da formação florestal, que passa de 28,4% (2015) para 29,1% (2024).

Esse rearranjo estrutural contemporâneo sugere a fragmentação de monoculturas extensivas e corrobora o diagnóstico de Marafon (2017) sobre a reconfiguração do espaço rural fluminense, marcada pelo surgimento de 'novas ruralidades' e pela diversificação de usos que rompem com a homogeneidade da pastagem. Essa fragmentação impõe riscos socioambientais imediatos: a substituição de áreas contínuas por mosaicos heterogêneos tende a ampliar o isolamento ecológico dos remanescentes (Rosa *et al.*, 2021), enquanto a intensificação do uso do solo, somada à pressão urbana, compromete a segurança hídrica e eleva a vulnerabilidade a desastres nas bacias hidrográficas (Pereira; Rodriguez, 2022; Viana *et al.*, 2023). Tal cenário, num contexto de incerteza climática, alinha-se ao alerta de Marengo, Tomasella e Nobre (2017) sobre os riscos sistêmicos que o planejamento inadequado do uso da terra impõe à segurança hídrica nacional.

A persistência da expansão urbana, mantendo seu ritmo de crescimento constante mesmo após a instituição de marcos regulatórios como a Lei da Mata Atlântica (2006), levanta discussões sobre a complexidade da gestão territorial. Este cenário de expansão contínua, apesar do arcabouço legal robusto, reflete as limitações dos indutores financeiros atuais. O ICMS Ecológico do Rio de Janeiro destina apenas 2,5% da cota-parte aos municípios (Rio De Janeiro, 2019), um percentual que muitas vezes não compete com os ganhos econômicos imediatos do mercado imobiliário e da expansão urbana nas baixadas costeiras (CEPERJ, 2025).

Embora o INEA (2024) reporte um avanço institucional, com 50 municípios possuindo Planos Municipais de Conservação e Recuperação da Mata Atlântica (PMMAs) aprovados, a curva ascendente de urbanização na Figura 7 indica que o ordenamento do crescimento das manchas urbanas permanece um desafio. É importante ressaltar que a eficácia desses instrumentos de planejamento ambiental no controle da mancha urbana requer análises comparativas específicas entre municípios com e sem planos vigentes, mas os dados agregados estaduais revelam

que a expansão do tecido construído segue uma trajetória independente das restrições de supressão de vegetação nativa impostas pela legislação federal.

Tal cenário reforça que, embora a Lei da Mata Atlântica atue rigorosamente na proteção da vegetação remanescente, o controle do crescimento urbano em si depende da integração com instrumentos de planejamento municipal. É importante notar que, embora a curva de urbanização não apresente inflexões, observa-se uma desaceleração na taxa de expansão decadal. O incremento da mancha urbana, que foi de 0,8% na primeira década, reduziu-se gradualmente para 0,7%, 0,6% e, mais recentemente, 0,4% entre 2015 e 2024. Essa perda de ritmo sugere que, apesar das pressões antrópicas ligadas aos setores imobiliário e industrial, a saturação das áreas disponíveis e os instrumentos de ordenamento começam a impor limites ao espraiamento do tecido construído.

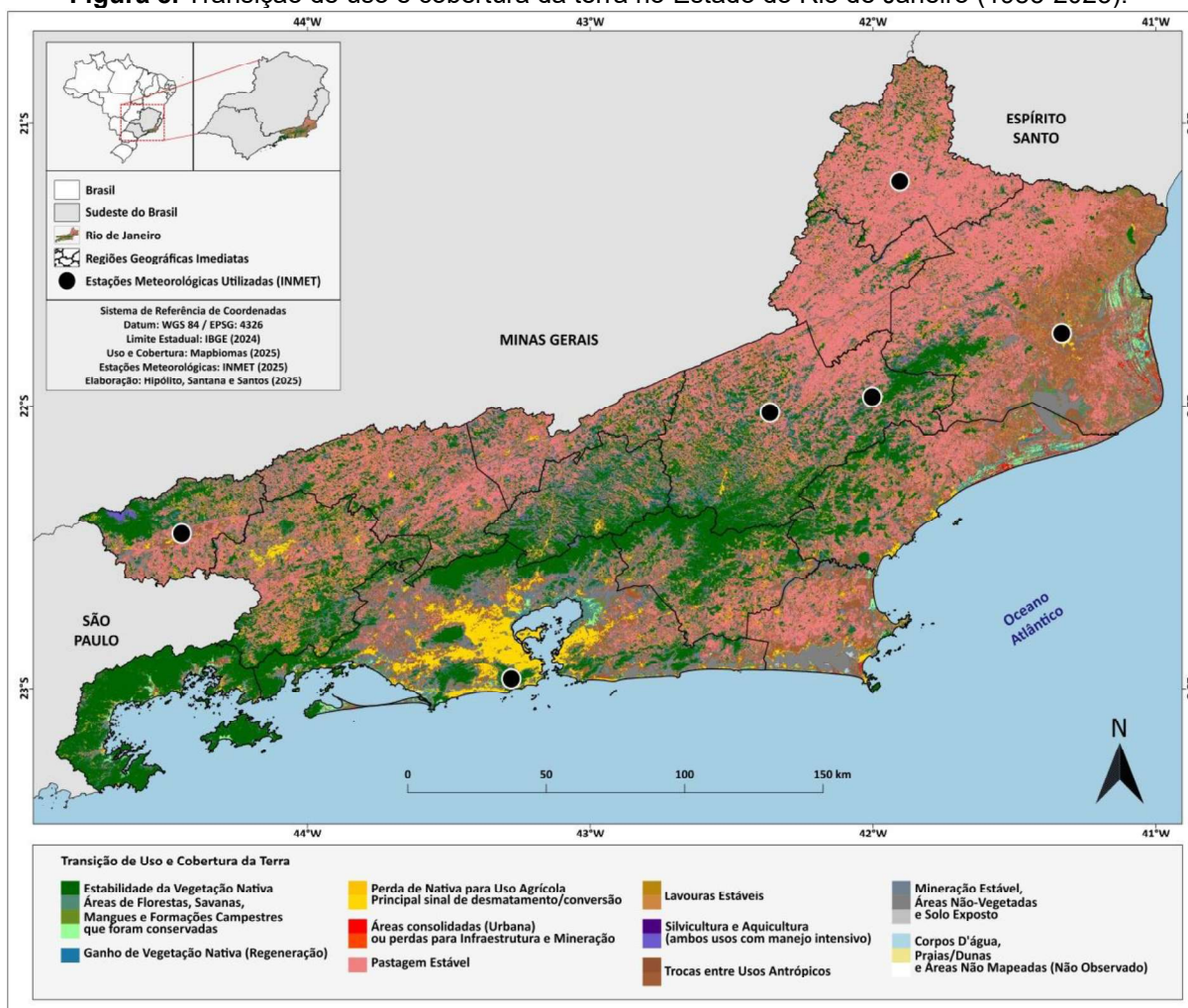
Esse descompasso corrobora a análise de Adams *et al.* (2020) e Rosa *et al.* (2021) sobre as lacunas entre a governança formal e a eficácia prática no território. Ratifica também os desafios apontados por Peixe e Mello (2020), que destacam a carência de recursos técnicos e financeiros nos municípios como um gargalo para que os PMMAs se tornem instrumentos efetivos de gestão. Diante disso, para que a manutenção da floresta, provedora vital de serviços ecossistêmicos (Wrege *et al.*, 2015), torne-se competitiva frente às diversas frentes de ocupação, é estratégico o fortalecimento de um conjunto de políticas integradas. Nesse sentido, a adoção de instrumentos econômicos, como o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), deve ser articulada ao comando-e-controle e ao planejamento urbano-ambiental rigoroso, oferecendo alternativas de viabilidade econômica à conservação em detrimento da conversão do solo.

Para avaliar o impacto ecológico dessas dinâmicas territoriais, a Figura 8 apresenta a matriz de transição de uso e cobertura da terra (1985–2023), evidenciando os fluxos de conversão e as áreas de persistência das classes ao longo do período analisado. Os resultados indicam que a regeneração (ganho de vegetação nativa) ocorre de forma difusa e periférica, predominantemente nas bordas dos remanescentes estáveis. Esse padrão sugere potencial para restauração passiva, o que permite classificar o estado como um *hopespot* de restauração, conceito que define áreas estratégicas para a recuperação da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos, nas quais a regeneração natural ou a restauração ativa

podem reverter o histórico de degradação e reconectar fragmentos isolados (Rezende *et al.*, 2018).

Apesar desse potencial, a análise crítica das trajetórias revela um cenário preocupante. A persistência de vetores de perda de vegetação nativa concomitante ao ganho caracteriza a “destruição oculta” descrita por Rosa *et al.* (2021), em que florestas maduras e ricas em carbono são substituídas por vegetação secundária jovem, de menor funcionalidade ecológica. Esse processo de *turnover* mantém o bioma em estado de alta fragmentação, perpetuando o isolamento já diagnosticado por Ribeiro *et al.* (2009).

Figura 8. Transição de uso e cobertura da terra no Estado do Rio de Janeiro (1985-2023).



Fonte: Elaboração própria (2025).

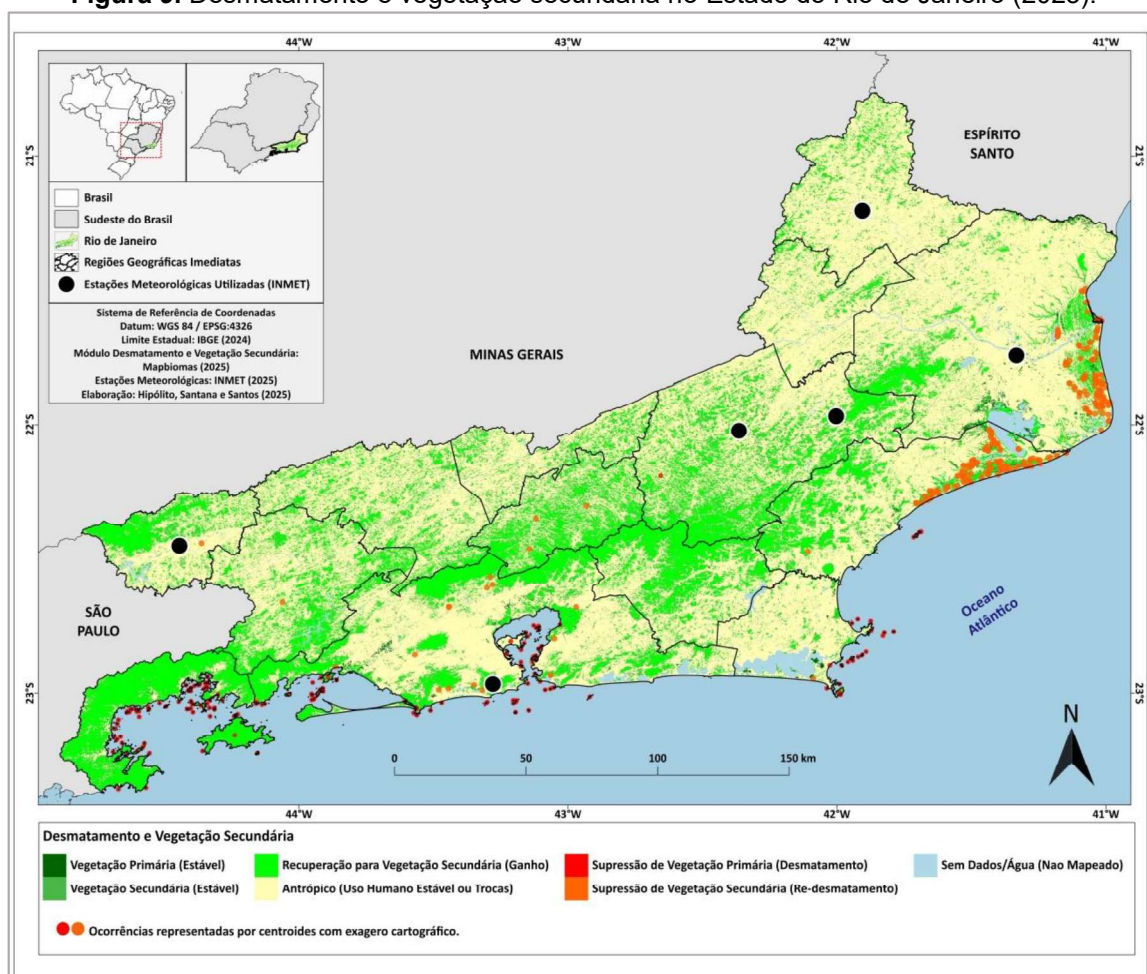
A espacialização desses fluxos confirma que a fragmentação não é aleatória, mas segue uma lógica econômica. A análise das Figuras 6 e 8 evidenciam que as áreas de perda de vegetação coincidem com as zonas de expansão urbana e

fronteiras agrícolas. Esse padrão reforça a premissa de que a floresta cede espaço justamente onde o solo possui maior valor econômico. Tal dinâmica corrobora os achados de Rosa *et al.* (2021), que identificaram que a supressão de florestas maduras concentra-se em terrenos planos e mecanizáveis (de alto custo de oportunidade), enquanto a regeneração fica restrita a terras marginais e de difícil acesso. Essa seletividade espacial, também discutida por Marafon (2017) no contexto da modernização agrícola fluminense, evidencia que a conservação compete desigualmente com usos de maior rentabilidade imediata, resultando no isolamento dos remanescentes.

A representação espacial desse conflito no cenário atual pode ser observada na Figura 9, que ilustra a distribuição dos eventos de supressão (desmatamento) e regeneração (vegetação secundária) detectados para o ano de 2023. A vegetação secundária, ou floresta regenerante, é definida como aquela que se desenvolve por meio de uma progressão de estágios sucessionais após distúrbios antropogênicos ou naturais de larga escala (Chazdon, 2012). Nesse processo de recuperação, a área passa por uma transição gradual em que a riqueza de espécies e a complexidade estrutural aumentam, partindo de estágios iniciais, frequentemente compostos por gramíneas e arbustos, até a recomposição de uma estrutura florestal mais complexa.

Diferente do padrão de 'arco de desmatamento' comum em fronteiras agrícolas ativas, o mapa do Rio de Janeiro revela uma pressão ambiental de caráter difuso. Dada a natureza pulverizada desses eventos, cujos polígonos individuais (pixels de 30m) são imperceptíveis na escala macroscópica estadual, procedeu-se à generalização cartográfica por meio de centroides. Esse recurso de representação é fundamental para que se localizem espacialmente as ocorrências que, de outra forma, seriam invisíveis graficamente, permitindo identificar a persistência do fenômeno em quase todas as RGIs. Essa característica de dispersão é validada pelos critérios de filtragem do algoritmo, que contabiliza apenas transições de uso da terra superiores a 0,5 hectare.

Figura 9. Desmatamento e vegetação secundária no Estado do Rio de Janeiro (2023).



Fonte: Elaboração própria (2025).

O processamento em ambiente SIG confirma que a supressão de vegetação no estado é composta por uma multiplicidade de pequenos eventos dispersos. Esse padrão reafirma a natureza fragmentária da ocupação antrópica fluminense e evidencia um importante desafio logístico: a dificuldade de fiscalizar e monitorar pressões ambientais que ocorrem de forma tão pulverizada e capilarizada na paisagem. Esse padrão reafirma a natureza fragmentária da ocupação antrópica fluminense e evidencia um importante desafio logístico: a dificuldade de fiscalizar e monitorar pressões ambientais que ocorrem de forma tão pulverizada e capilarizada na paisagem.

A predominância de pequenos polígonos de desmatamento impõe severos desafios logísticos e custos proibitivos às ações de comando-e-controle baseadas em fiscalização *in loco* (Oliveira; Alves; Ferreira, 2018), diagnóstico que fundamenta a necessidade de integração de dados e padronização de critérios para monitoramento e emissão de autorizações de supressão, conforme proposto no

Plano de Ação Para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas na Mata Atlântica (Brasil, 2025a).

A análise quantitativa desses vetores espaciais, ilustrada na Tabela 2, confirma a predominância dos processos de regeneração visualizados na Figura 9.

Tabela 2. Quantificação das áreas de supressão e recuperação da vegetação nativa no Estado do Rio de Janeiro (2023).

Classe de Evento (Legenda MapBiomas)	Código (DN)	Frequência (N_{px})	Área Calculada (A_{ha})
Recuperação (Antrópico → Veg. Nativa)	5	22.000	1.980,00
Supressão Total (Perda de Veg. Primária e Secundária)	4 + 6	1.319	118,71
TOTAL ANALISADO	-	23.319	2.098,71

Fonte: Elaboração própria (2025).

Os dados extraídos a partir do módulo de desmatamento e vegetação secundária (Projeto MapBiomas, 2025; Souza *et al.*, 2020), revelam um balanço positivo para a cobertura vegetal no recorte analisado. A área regenerada por processos de recuperação totalizou 1.980,00 hectares, enquanto a supressão acumulada no mesmo período foi de 118,71 hectares.

A aplicação do IRT resultou em um coeficiente de 16,68, indicando um superávit de resiliência territorial, evidenciando um cenário onde as forças de regeneração natural superam os vetores de supressão no recorte analisado. Esse resultado, contudo, deve ser interpretado com cautela, embora a Tabela 2 indique um ganho líquido de 1.980,00 hectares, este valor refere-se à classe de recuperação (vegetação secundária inicial), enquanto a supressão de 118,71 hectares, detectada pelo módulo de desmatamento, incide predominantemente sobre remanescentes de florestas estabelecidas.

Conforme destaca Chazdon (2012), a vegetação jovem leva décadas para atingir a funcionalidade da floresta madura perdida, que é detentora de maiores estoques de carbono e biodiversidade (SOS Mata Atlântica; INPE, 2024). Esse ciclo de substituição de florestas maduras por vegetação secundária em estágio inicial aumenta a vulnerabilidade ecológica (Vale *et al.*, 2021) e reduz a provisão de

serviços ecossistêmicos essenciais, como a regulação do ciclo hidrológico (Luiz-Silva; Oscar-Júnior, 2022), ampliando o risco de extinção de espécies nativas.

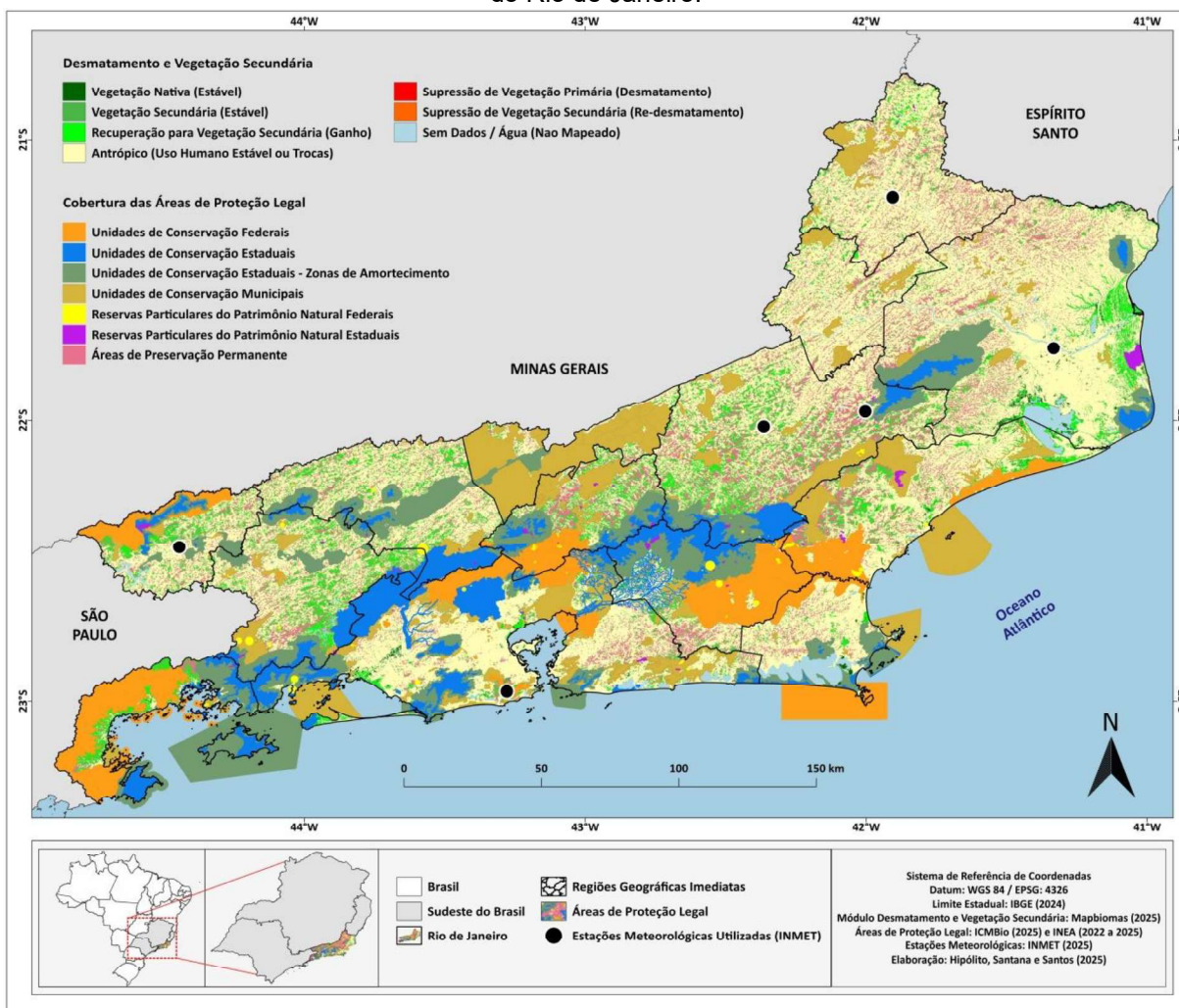
Ao espacializar esses fluxos sobre o território, a identificação dos pontos destacados revelou riscos específicos, como a persistência de eventos em áreas de alta declividade nas regiões serranas (RGIs 07 e 08). A ocorrência de supressão nessas encostas, correlacionada ao relevo da Figura 1, evidencia um descompasso com a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (Brasil, 2012a), visto que a remoção da cobertura florestal potencializa o risco de desastres geo-hidrológicos, conforme documentado por Dourado, Arraes e Silva (2012) para a região serrana fluminense.

Adicionalmente, a análise espacial da Figura 9 evidencia que a supressão ocorre sobretudo nas bordas dos fragmentos florestais e ao longo do eixo litorâneo, revelando que a fragmentação e a expansão urbana exercem pressões tão críticas quanto as fronteiras agropecuárias do interior do Estado. Esse padrão, embora capilarizado, é condizente com as dinâmicas descritas por Teixeira *et al.* (2022), indicando que fragmentos em estágio inicial de regeneração ainda enfrentam pressões de conversão para usos antrópicos. Tal cenário indica um desafio na implementação plena da Lei da Mata Atlântica, uma vez que a permanência dessas supressões capilarizadas, mesmo em territórios com PMMAs instituídos, sugere que o planejamento formal ainda encontra obstáculos práticos na escala da execução local.

Nesse contexto, para fortalecer a trajetória de recuperação detectada, as implicações deste estudo apontam para a importância de estratégias que integrem mecanismos econômicos aos de comando-e-controle. O aprimoramento de políticas como o ICMS Ecológico poderia atuar como um indutor para que os municípios priorizem a manutenção dos estágios sucessionais, tornando a conservação de áreas em regeneração mais atrativa frente a novos usos do solo.

Complementarmente, a Figura 10 apresenta a sobreposição espacial da dinâmica da cobertura vegetal em relação à malha de proteção ambiental. O cruzamento entre as bases vetoriais oficiais (INEA, 2025) e os dados de transição gerados nesta pesquisa revela que a supressão florestal, embora quantitativamente inferior à recuperação, distribuiu-se de forma difusa pelo território, atingindo inclusive áreas de alta restrição legal.

Figura 10. Sobreposição entre a dinâmica da cobertura vegetal e áreas de proteção legal no Estado do Rio de Janeiro.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Observa-se na Figura 10 que a supressão transpassa as barreiras institucionais, ocorrendo tanto em áreas sem proteção específica quanto no interior de Zonas de Amortecimento, UCs de uso sustentável e, criticamente, sobre APPs de topo de morro e faixas marginais. Este padrão de vulnerabilidade dialoga com o diagnóstico de Carvalho, Silva e Salvio (2022) sobre a fragilidade institucional de categorias como as Áreas de Proteção Ambiental (APAs) frente à fragmentação. Os resultados também corroboram as conclusões de Teixeira *et al.* (2022), segundo as quais a pressão da matriz antrópica no entorno transforma limites cartográficos em fronteiras permeáveis, comprometendo o isolamento efetivo das UCs e gerando o que se define aqui como porosidade legal. Esta porosidade refere-se às lacunas na governança que permitem que ocupações de pequena escala avancem sobre áreas

protegidas, explorando a dificuldade do Estado em monitorar de forma capilarizada as restrições impostas pela legislação.

A Figura 10 evidencia que a supressão não se restringe às bordas das UCs, mas penetra em seus perímetros internos, configurando um processo de fragmentação interna que compromete a integridade ecológica de ecossistemas sensíveis, como as restingas e áreas de manguezal no litoral fluminense. Nas RGI 04 e 05, a supressão sobre APPs de nascentes coincide com áreas de recarga da Bacia do Paraíba do Sul. A remoção da vegetação nessas zonas, mapeadas pelo Comitê da Bacia do Médio Paraíba do Sul e pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) (2024) como de alto potencial poluidor, pode comprometer a infiltração e a manutenção da vazão de base (Tucci, 2001), agravando a degradação hídrica histórica da região (Malafaia; Miranda; Gomes, 2012). Já no litoral (RGI 10, 13 e 14), a pressão sobre Restinga e Manguezal rompe a conectividade da paisagem, reduzindo a resiliência costeira frente às mudanças climáticas descrita pelo MMA (Brasil, 2018). A análise espacial confirma que as categorias de uso sustentável, como as APAs, apresentam maior porosidade frente às pressões antrópicas. A densidade de centroides nessas zonas sugere que a flexibilidade normativa dessas unidades acaba por facilitar a conversão capilarizada da vegetação, dificultando o controle territorial efetivo.

Diante desse panorama territorial, os resultados apontam para a importância de estratégias de gestão que integrem o ordenamento territorial (como o fortalecimento de corredores ecológicos e a proteção de áreas de recarga) a mecanismos de incentivo econômico (PSA e ICMS Ecológico). Essa integração fundamenta a aplicação de Soluções Baseadas na Natureza (SbN), uma vez que a supressão difusa detectada em APPs e Unidades de Conservação compromete diretamente o Índice Final de Conservação Ambiental (IFCA), índice que sintetiza o desempenho em áreas protegidas, mananciais e saneamento para fins de repasse tributário (CEPERJ, 2025). Como o cálculo do ICMS Ecológico (Rio de Janeiro, 2019) pondera a conservação e a qualidade ambiental, a porosidade legal aqui mapeada representa não apenas uma fragilidade ecológica, mas um passivo financeiro para os municípios fluminenses. Isso ocorre porque a supressão em Unidades de Conservação e APPs impacta diretamente os subíndices Áreas Protegidas e Mananciais, que juntos possuem peso significativo na composição do

IFCA (Rio de Janeiro, 2019). Portanto, a falha no monitoramento dessas áreas, detectada via MapBiomas, traduz-se em uma perda real de arrecadação extrafiscal.

Ao priorizar a recuperação da infraestrutura verde via SbN, as gestões locais podem recompor serviços ecossistêmicos vitais de regulação hídrica e microclimática (Ivanova; Randhir; Randhir, 2025), otimizando o repasse de recursos extrafiscais e revertendo a tendência de degradação capilarizada observada nas áreas protegidas.

4.2 Análise Descritiva e de Tendência das Variáveis Climáticas

As Figuras 11, 12 e 13 apresentam as séries temporais da precipitação diária e temperaturas máxima e mínima, referentes ao período de 1972 a 2025 nas seis estações meteorológicas selecionadas do Estado do Rio de Janeiro, compondo uma análise exploratória inicial. Essa etapa possibilita a caracterização dos diferentes regimes climáticos do estado e a avaliação da consistência das séries históricas utilizadas.

A distribuição dessas estações permite observar como as diferentes unidades de relevo e padrões de cobertura vegetal influenciam as variáveis locais. O Alto da Boa Vista (RGI 01), por exemplo, está inserido em um contexto de densa cobertura florestal e relevo de maciço litorâneo (Figuras 1 e 6), o que favorece a retenção de umidade. Em contraste, as estações de Campos e Itaperuna (RGIs 10 e 11) situam-se em áreas de baixada e tabuleiros com predominância de pastagens (Figuras 1 e 6), o que influencia diretamente a maior amplitude térmica e os menores volumes pluviométricos registrados (Alvares *et al.*, 2013; Gotardo *et al.*, 2019; Tavares e Santos, 2022).

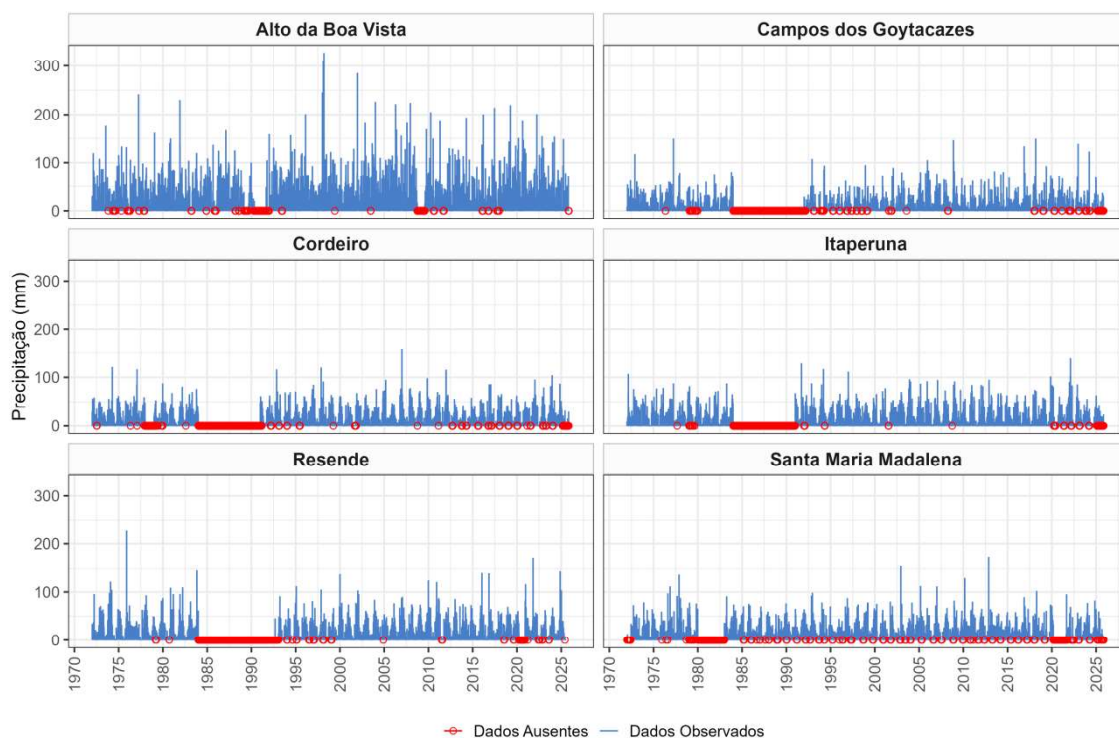
A Figura 11, referente à precipitação diária, evidencia a elevada variabilidade sazonal e interanual das chuvas, característica típica do regime pluviométrico da região. De modo geral, observa-se que todas as estações apresentam flutuações relevantes na precipitação ao longo das décadas. Observa-se que, enquanto o Alto da Boa Vista apresenta uma série consistente e com volumes elevados de forma contínua, as estações do interior, como Itaperuna e Cordeiro, exibem descontinuidades nas séries (representadas pelos pontos em vermelho), o que evidencia a necessidade de cautela na interpretação de eventos pontuais.

O Alto da Boa Vista (RGI 01) exhibe níveis pluviométricos mais elevados em comparação às demais localidades. Esse comportamento está diretamente associado à compartimentação do relevo ilustrada na Figura 1, em que a localização da estação na encosta de barlavento do Maciço da Tijuca favorece a ascensão orográfica de massas úmidas. Esse mecanismo de forçante topográfica atua como modulador do regime climático local, proporcionando maior regularidade nos volumes de precipitação. Diferentemente das estações de baixada, que dependem predominantemente de sistemas transientes e frentes frias, a topografia do Maciço favorece a manutenção de aportes hídricos mesmo em anos de menor pluviosidade regional, reduzindo a amplitude das flutuações climáticas. Tal dinâmica corrobora as discussões de Tavares e Santos (2022) e Luiz-Silva e Oscar-Júnior (2022) sobre o papel do relevo como modulador da resiliência hídrica no cenário fluminense.

Por outro lado, as séries temporais de Campos e Itaperuna (RGIs 10 e 11) apresentam volumes pluviométricos menores. Essa dinâmica reflete a inserção dessas estações em áreas de baixadas e tabuleiros (Figura 1), onde a menor influência orográfica é agravada por fatores de escala regional e local. Meteorologicamente, essas regiões sofrem maior influência do ramo descendente do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), sistema de alta pressão que favorece a subsidência do ar, inibindo a convecção e a formação de nuvens de chuva (Reboita *et al.*, 2010). A persistência desse sistema, especialmente em anos de bloqueio atmosférico, consolida o caráter mais seco do Norte e Noroeste Fluminense. Somado a isso, a substituição da cobertura florestal original por áreas de pastagem (Figura 6), reduz a rugosidade do terreno e a capacidade de reciclagem de umidade via evapotranspiração.

Tal configuração geográfica, observada na distribuição do uso do solo (Figura 6) e refletida nos menores acumulados pluviométricos registrados (Figura 11), sugere maior vulnerabilidade hídrica nessas localidades. Essa condição decorre da baixa capacidade de retenção de umidade do sistema solo-vegetação degradado, o que acentua a irregularidade hídrica observada no gráfico e corrobora as análises de Gotardo *et al.* (2019) sobre a influência do uso do solo no regime pluviométrico do Sudeste brasileiro.

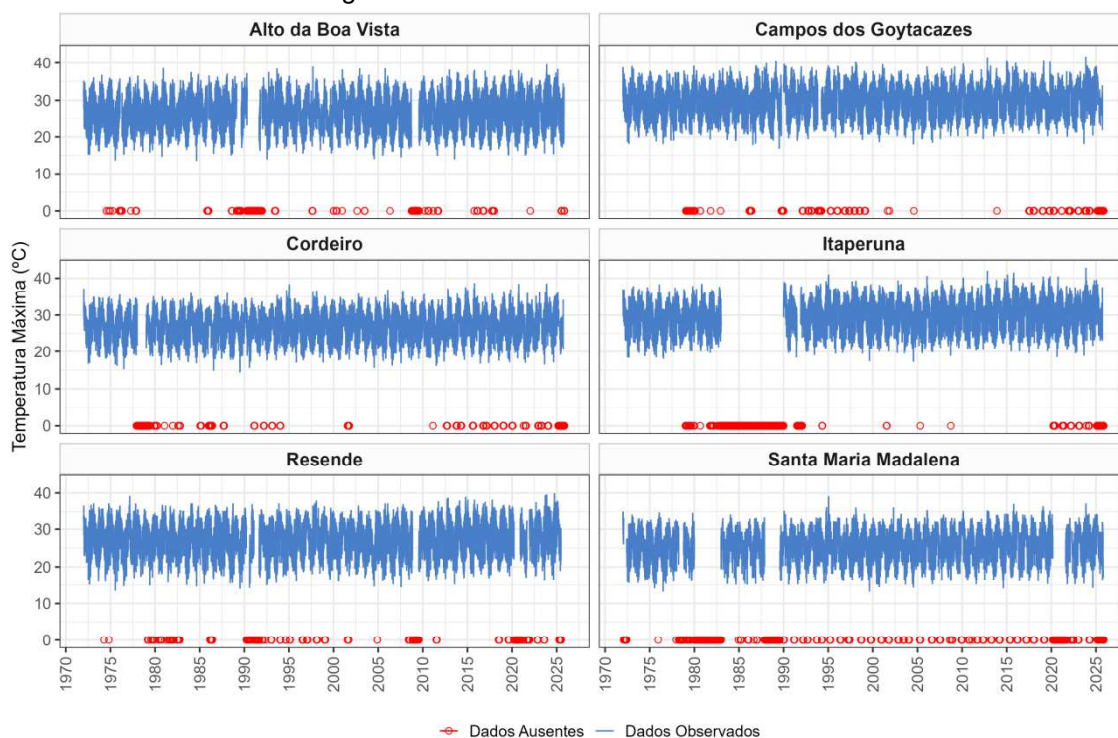
Figura 11. Séries temporais da precipitação diária (1972–2025) das seis estações meteorológicas selecionadas do Estado do Rio de Janeiro.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Na Figura 12, que apresenta as séries da temperatura máxima diária, nota-se uma tendência de elevação gradual ao longo das últimas décadas. Essa trajetória de aquecimento é mais acentuada em estações situadas em áreas de baixa altitude e com expressiva conversão antrópica, como Campos dos Goytacazes e Itaperuna. Nessas localidades, a substituição da cobertura vegetal por pastagens e manchas urbanas (Figura 6) reduz o efeito moderador da evapotranspiração, favorecendo a retenção de calor sensível em superfície (Silva e Dereczynski, 2014).

Figura 12. Séries temporais da temperatura máxima diária (1972–2025) das seis estações meteorológicas selecionadas do Estado do Rio de Janeiro.



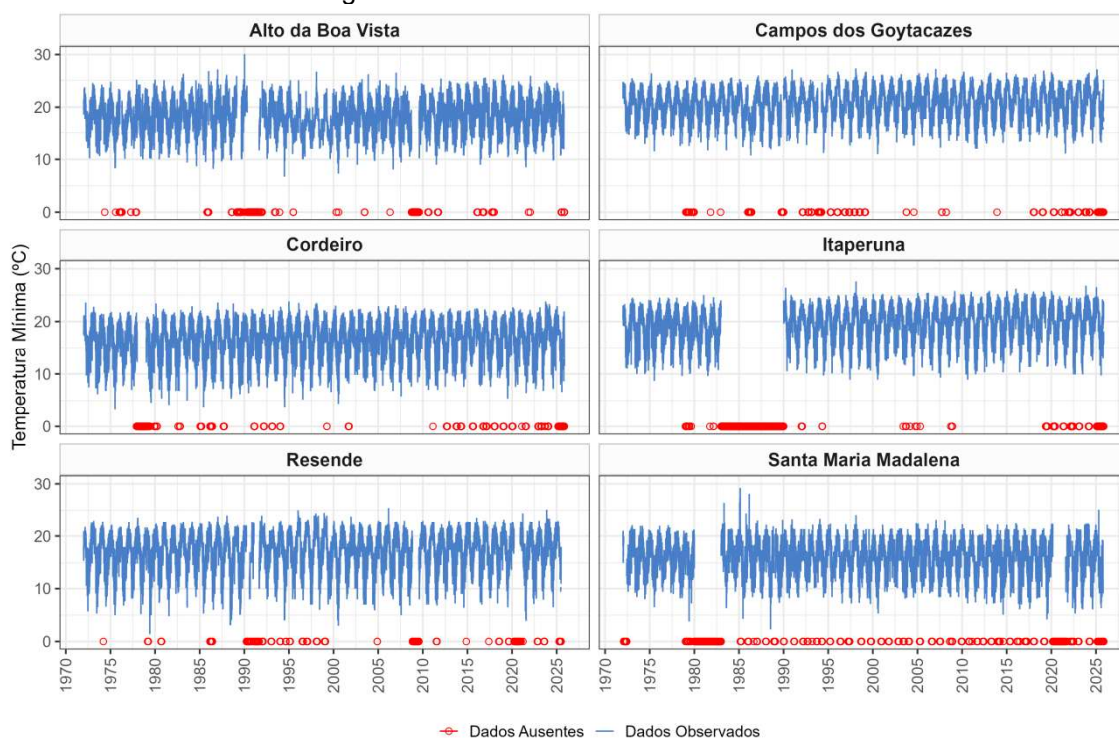
Fonte: Elaboração própria (2026).

A Figura 13, por sua vez, mostra a evolução da temperatura mínima diária. Observa-se que algumas localidades, como Campos dos Goytacazes, apresentam uma elevação das mínimas ao longo das últimas décadas, refletindo noites mais quentes e possivelmente maior influência da urbanização. Esse fenômeno associa-se à substituição da cobertura vegetal por superfícies urbanas e pastagens (Figura 6), que alteram o balanço de energia em superfície ao aumentar a retenção de calor sensível durante o dia e dificultar o resfriamento radiativo noturno (Gotardo *et al.*, 2019). Já em áreas como Santa Maria Madalena (RGI 08), a ocorrência relativamente frequente de valores mais baixos relaciona-se ao compartimento serrano e à preservação de remanescentes florestais (Figuras 1 e 6), que atuam como moderadores térmicos locais, minimizando a amplitude térmica e favorecendo a manutenção de patamares térmicos mais amenos ao longo da série (Arthur; Saffer, 2017).

Essa heterogeneidade espacial indica que o aquecimento não é uniforme no Estado do Rio de Janeiro. As séries temporais (Figura 13) indicam que os padrões de elevação das mínimas coincidem com as áreas de menor altitude (Figura 1) e maior conversão para uso antrópico (Figura 6). Em contrapartida, o comportamento

notavelmente mais constante observado nas estações serranas de Santa Maria Madalena e Cordeiro (RGI 08) reflete a influência direta do relevo acidentado e da cobertura florestal ainda preservada nessas regiões. Os resultados evidenciam que são justamente as especificidades regionais de uso do solo e de topografia que modulam o comportamento diferenciado das temperaturas mínimas no território fluminense.

Figura 13. Séries temporais da temperatura mínima diária (1972–2025) das seis estações meteorológicas selecionadas do Estado do Rio de Janeiro.



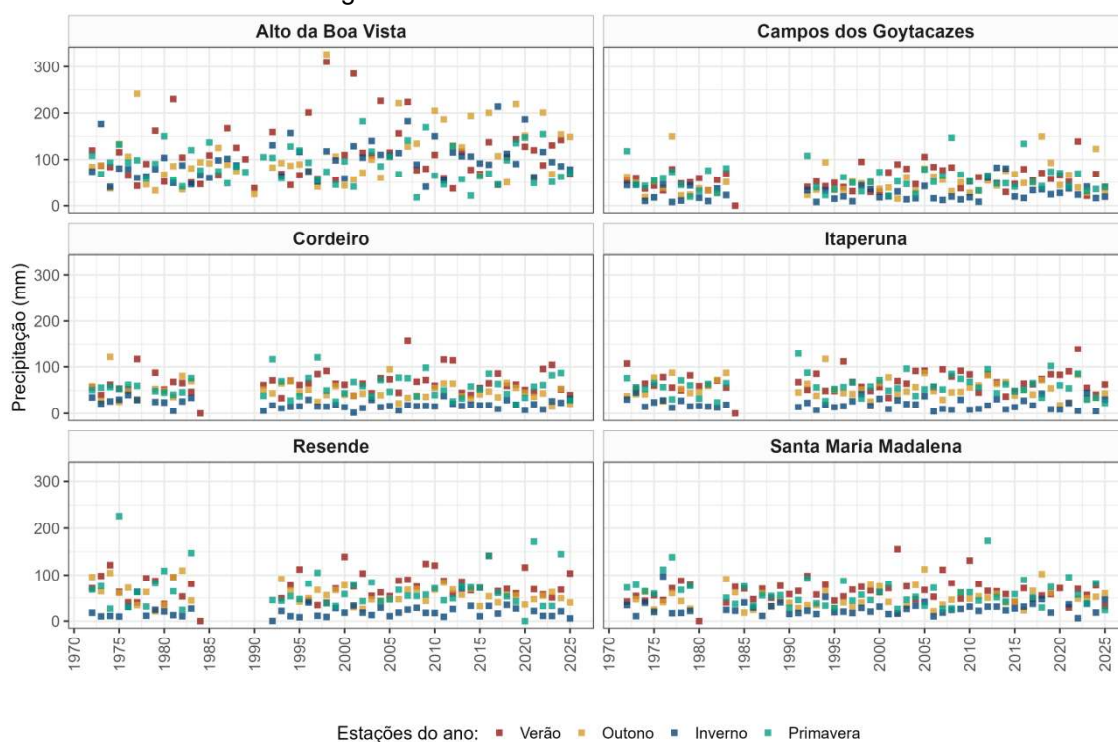
Fonte: Elaboração própria (2026).

As Figuras 14, 15 e 16 apresentam, respectivamente, os extremos anuais de precipitação e temperatura máxima e mínima, organizados por estação do ano, nas seis estações meteorológicas selecionadas do Estado do Rio de Janeiro. A Figura 14 evidencia os máximos anuais da precipitação diária, com maior concentração de eventos extremos na primavera e verão na maioria das regiões analisadas, período marcado pela atuação de sistemas convectivos, frentes frias e pela ZCAS (Carvalho, Jones e Liebmann, 2004). A ZCAS é o principal sistema atmosférico responsável pela intensificação das chuvas no Sudeste do Brasil, atuando principalmente entre o final da primavera e o verão. Sua ocorrência está diretamente relacionada a

episódios de precipitação extrema e a desastres hidrometeorológicos, conforme destacado por Verdán (2025).

A Estação do Alto da Boa Vista (RGI 01) se destaca pela intensidade dos máximos de precipitação, conforme apresentado na Figura 14. Ao longo da série histórica, observa-se a recorrência de picos pluviométricos que superam os valores registrados nas demais estações, ocorrendo predominantemente durante o verão e o outono, sendo o verão período crítico para a ocorrência de chuvas intensas no Sudeste, impulsionado pela atuação de sistemas convectivos, frentes frias e pela ZCAS (Carvalho; Jones; Liebmann, 2004; Reboita *et al.*, 2010).

Figura 14. Máximos anuais da precipitação diária, por estação do ano, registrados nas seis estações meteorológicas selecionadas do Estado do Rio de Janeiro.



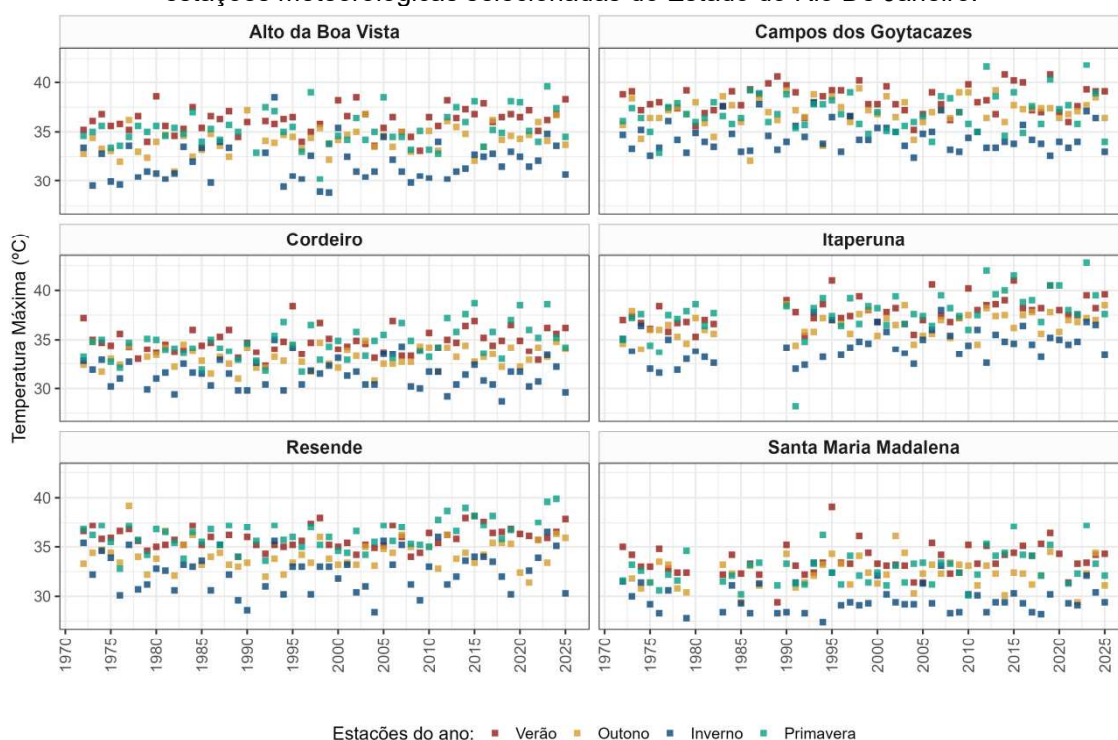
Fonte: Elaboração própria (2026).

Os extremos registrados no outono (particularmente em março e abril) associam-se ao grande aporte de umidade remanescente e à incursão das primeiras frentes frias mais intensas da temporada. O contraste entre o ar quente ainda presente e a chegada de sistemas frontais mais robustos potencializa a severidade das chuvas nesta transição sazonal (Silva; Dereczynski, 2014). Portanto, os resultados evidenciam que a complexidade da dinâmica climática local é marcada pela interação entre processos de grande escala e os condicionantes topográficos e

de cobertura vegetal (Figuras 1 e 6), que consolidam essa região como um núcleo de extremos pluviométricos no estado, onde a topografia atua como o principal modulador da severidade dos eventos (Silva; Dereczynski, 2014; Sobral *et al.*, 2018).

Na Figura 15, referente aos máximos anuais da temperatura máxima diária, observa-se elevação na intensidade dos episódios de calor extremo, especialmente em Campos dos Goytacazes e Itaperuna (RGIs 10 e 11). Esse padrão sugere um incremento nos picos térmicos anuais, em consonância com as discussões sobre variabilidade climática e com os efeitos locais da urbanização e supressão vegetal (Figura 6). A ocorrência de episódios de magnitude histórica no triênio 2023 - 2025 é corroborada pelo relatório do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (Brasil, 2025b), que aponta uma intensificação sistemática desses eventos no Brasil na última década (2015–2025), associada à persistência de bloqueios atmosféricos que elevam os patamares térmicos regionais.

Figura 15. Máximos anuais da temperatura máxima diária, por estação do ano, registrados nas seis estações meteorológicas selecionadas do Estado do Rio De Janeiro.



Fonte: Elaboração própria (2026).

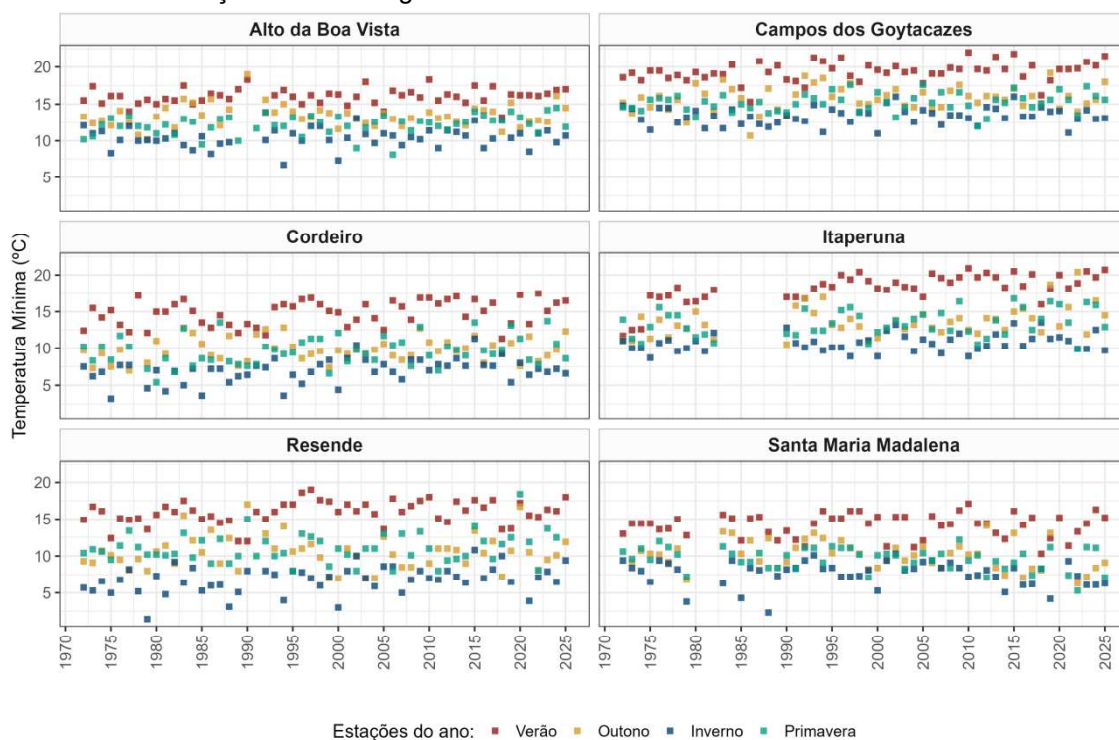
Para o território fluminense, a nota técnica do INMET (2026) sobre dezembro de 2025 confirma desvios positivos significativos nas temperaturas máximas em

relação à normal climatológica. Portanto, os recordes observados nas séries de Itaperuna e Campos (Figura 15) evidenciam a vulnerabilidade dessas regiões diante da nova escala de severidade dos eventos extremos de calor (Brasil, 2025a; INMET, 2026), onde a baixa rugosidade do terreno e a ausência de cobertura florestal potencializam a retenção de calor em superfície.

A distribuição sazonal dos máximos (Figura 15) evidencia a predominância de valores mais elevados durante o verão, mas também revela a ocorrência de episódios de calor extremo em outras estações, sobretudo na primavera. Esse padrão, discutido por Brasiense *et al.* (2020), associa-se à combinação de céu claro e redução da umidade atmosférica que antecede o período chuvoso, especialmente em episódios observados nos meses de setembro e outubro. A alta incidência de radiação solar nessas condições justifica picos térmicos detectados em Itaperuna, Cordeiro e Resende (RGIs 11, 08 e 05). Ao confrontar esses dados com a caracterização do relevo (Figura 1) e o mapeamento de uso e cobertura da terra (Figura 6), nota-se que a vulnerabilidade a esses picos é modulada localmente: enquanto a supressão vegetal (Figura 6) em áreas de baixada potencializa o estresse térmico, a altitude e a preservação dos remanescentes florestais nas áreas serranas (Figuras 1 e 6) ainda atuam como moderadores térmicos eficazes, minimizando a magnitude dos extremos mesmo durante esses eventos térmicos regionais.

A Figura 16 apresenta os mínimos anuais da temperatura mínima diária. Os dados indicam que, embora ainda ocorram episódios de frio mais intenso, especialmente durante o inverno, observa-se uma redução na frequência e na intensidade desses eventos de frio extremo em localidades como Cordeiro e Santa Maria Madalena (RGI 08). Esse padrão sugere noites mais quentes, com impacto direto na amplitude térmica diária. Conforme os resultados de Silva e Dereczynski (2014), essa tendência de elevação das temperaturas mínimas no estado reflete um aquecimento sistemático que dificulta a manutenção de limiares térmicos baixos, mesmo nos meses de inverno.

Figura 16. Mínimos anuais da temperatura mínima diária, por estação do ano, registrados nas seis estações meteorológicas selecionadas do Estado do Rio de Janeiro.



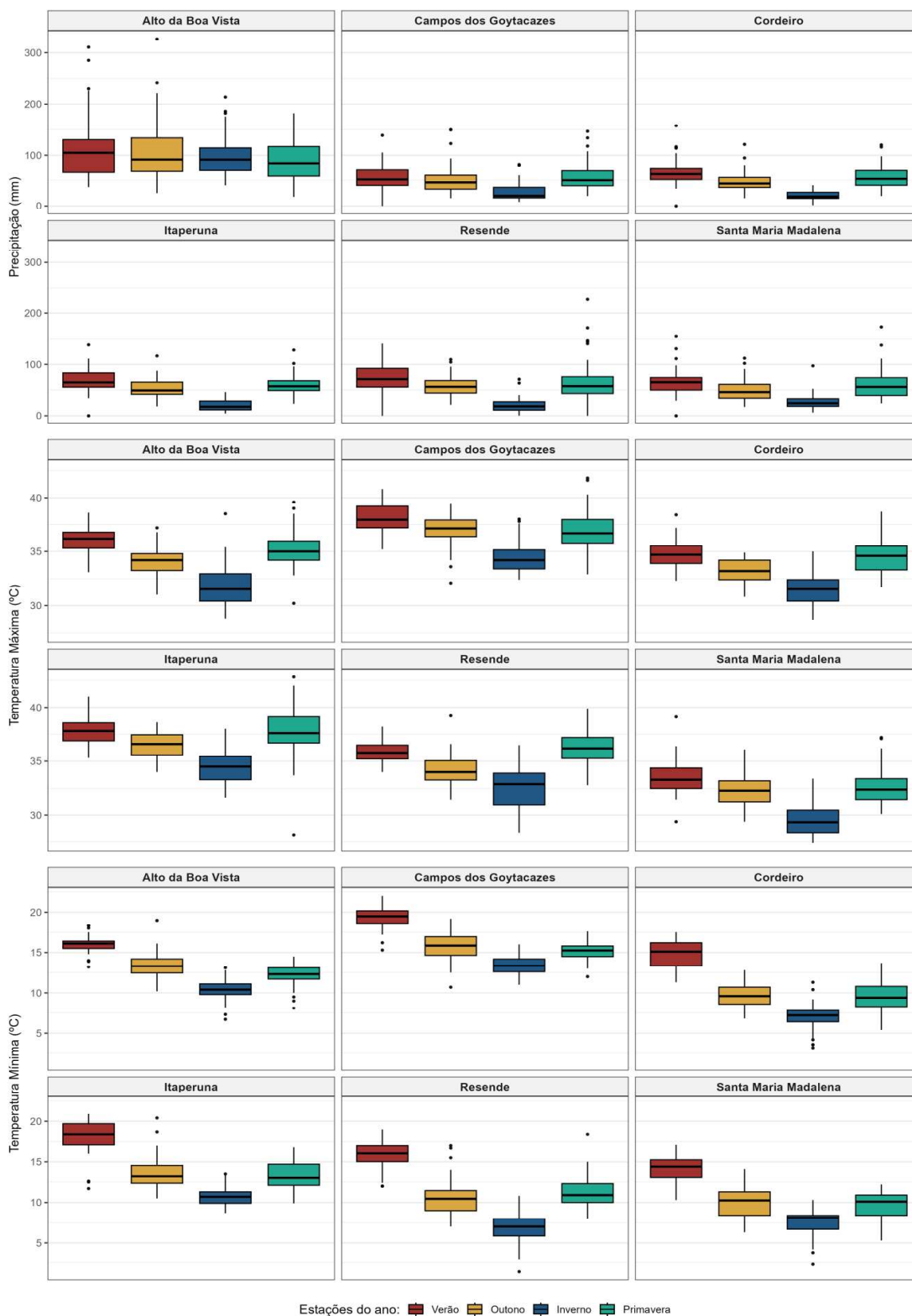
Fonte: Elaboração própria (2026).

A Figura 17 apresenta a distribuição sazonal dos extremos anuais. Em relação à precipitação, verifica-se que o verão concentra os maiores volumes pluviométricos, com destaque para Alto da Boa Vista (RGI 01) e Resende (RGI 05), onde a mediana se mostra mais elevada. O outono evidencia uma redução nos valores, embora ainda mantenha níveis moderados em localidades como Alto da Boa Vista. O inverno caracteriza-se pela escassez de chuvas, com valores bastante reduzidos em todas as regiões, enquanto a primavera revela uma retomada gradual da precipitação, indicando a transição para o regime chuvoso característico do verão.

A análise das temperaturas evidencia um padrão sazonal bem definido (Figura 17). No caso da temperatura máxima, o verão concentra os valores mais elevados, sobretudo em Itaperuna (RGI 11) e Campos dos Goytacazes (RGI 10), seguido por uma redução moderada no outono, condições mais amenas no inverno e recuperação gradual na primavera. Em relação à temperatura mínima, o verão apresenta os maiores registros, refletindo noites mais quentes em regiões de menor altitude; o outono marca uma transição com redução progressiva; o inverno concentra os menores valores, especialmente em localidades em maciços e áreas serranas como Alto da Boa Vista

(RGI 01) e Cordeiro (RGI 08); e a primavera indica elevação gradual, sinalizando o retorno das condições mais quentes.

Figura 17. Distribuição sazonal dos extremos anuais de precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima diária para as estações meteorológicas selecionadas.



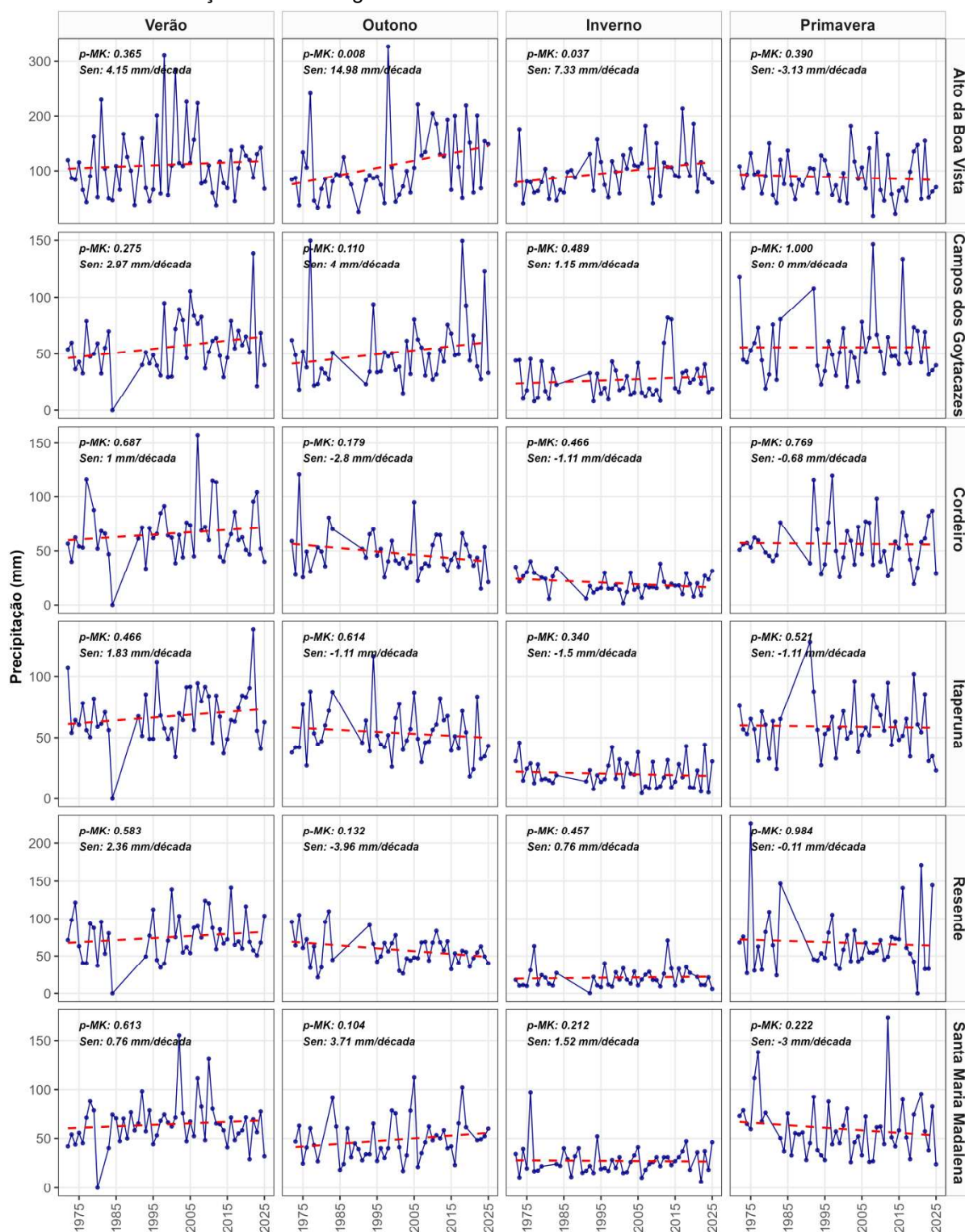
Estações do ano: Verão Outono Inverno Primavera

Fonte: Elaboração própria (2026).

As Figuras 18, 19 e 20 apresentam, respectivamente, as séries temporais dos extremos anuais de precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima, organizadas por estação do ano, nas seis estações meteorológicas selecionadas do Estado do Rio de Janeiro. A análise dos valores máximos anuais de precipitação (Figura 18) evidencia discrepâncias marcantes entre as regiões: enquanto a estação do Alto da Boa Vista (RGI 01) registra recorrentemente máximos anuais elevados, as estações de Campos e Itaperuna (RGIs 10 e 11) apresentam volumes menores.

Esta diferença observada na série histórica reflete diretamente a compartimentação do relevo apresentada na Figura 1. Nas áreas das RGIs 10 e 11, os menores volumes precipitados corroboram a climatologia descrita por Sobral *et al.* (2018) e as estimativas de Tavares e Santos (2022), que confirmam que o Norte e Noroeste apresentam patamares de precipitação máxima diária inferiores às áreas de influência da Serra do Mar, onde o efeito orográfico força a ascensão de massas de ar úmidas, resultando em resfriamento e precipitação intensa na encosta barlavento (Arthur; Saffer, 2017).

Figura 18. Série temporal dos valores máximos anuais de precipitação, por estação do ano, das seis estações meteorológicas selecionadas do Estado do Rio de Janeiro.



Fonte: Elaboração própria (2026).

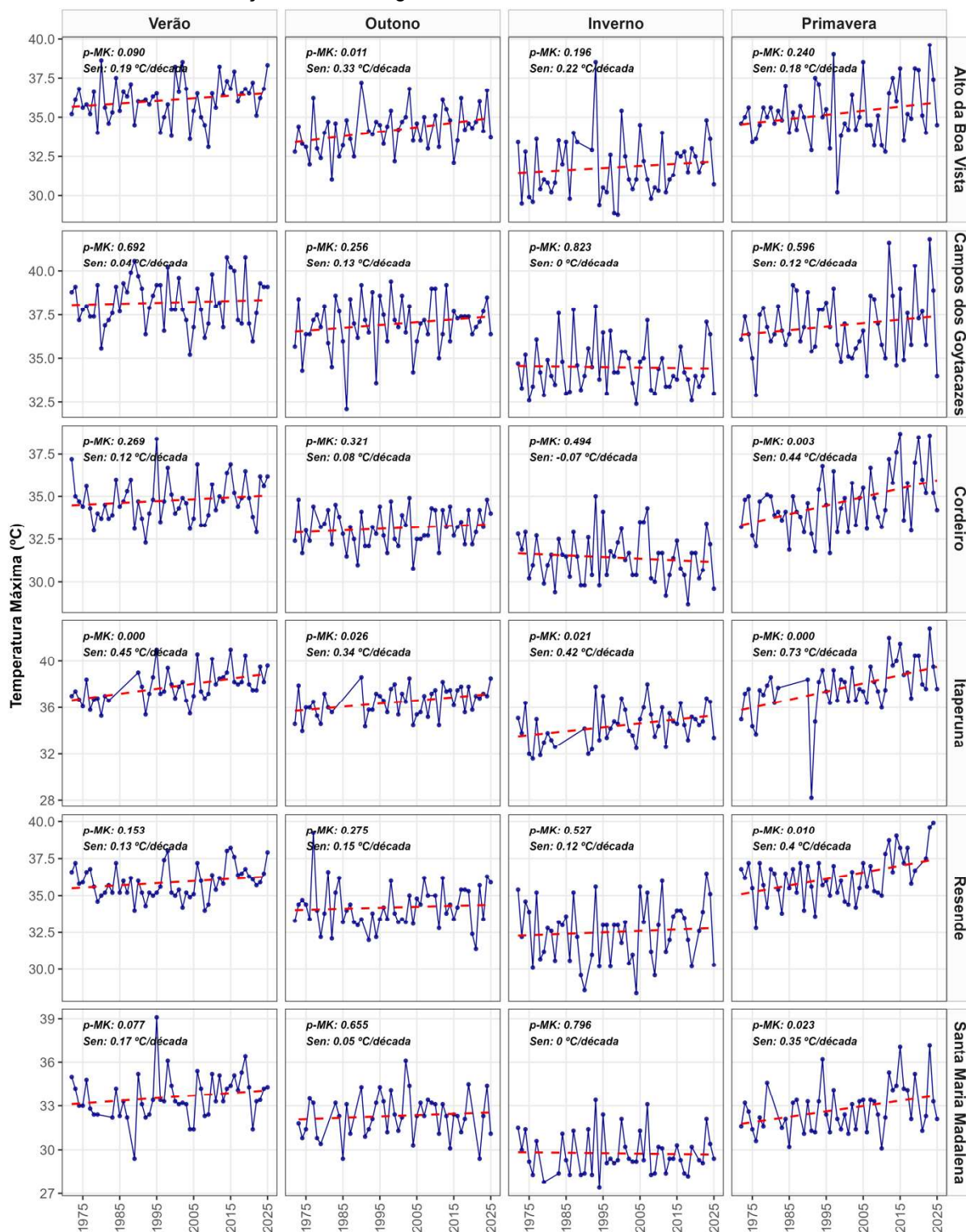
Além das diferenças espaciais, as séries históricas revelam forte variabilidade interanual e indícios de intensificação dos extremos pluviométricos nas últimas

décadas. Em Alto da Boa Vista, observa-se a persistência de valores elevados, sobretudo no outono. Em Campos, embora os totais sejam menores, também se identificam sinais de incremento nos máximos recentes, especialmente no mesmo período sazonal (outono). Esse comportamento sugere que, mesmo em regiões com menor influência orográfica, há uma tendência de aumento na severidade dos eventos, possivelmente associada às mudanças climáticas globais e às alterações locais de uso e cobertura da terra.

A série temporal dos valores máximos anuais de temperatura máxima (Figura 19) revela uma tendência clara de intensificação dos episódios de calor extremo nas últimas décadas. De forma geral, em todas as estações analisadas, observa-se um aumento progressivo nos registros, especialmente no verão e na primavera, sugerindo maior exposição às ondas de calor. Em Santa Maria Madalena, embora os valores sejam tradicionalmente mais moderados devido à influência da altitude e da cobertura florestal remanescente, também há sinais de elevação nos extremos recentes, indicando que mesmo áreas com maior resiliência climática estão sendo afetadas pelo aquecimento regional.

Ao relacionar esses resultados (Figura 19) com o mapeamento de uso e cobertura da terra (Figura 6), observa-se que as áreas com maiores registros térmicos coincidem com as regiões de menor cobertura vegetal nativa. Conforme Silva e Dereczynski (2014) e Gotardo *et al.* (2019), essa alteração estrutural no balanço de energia em superfície redefine os limiares de calor na primavera e no verão, tornando os eventos extremos mais frequentes e persistentes.

Figura 19. Série temporal dos valores máximos anuais de temperatura máxima, por estação do ano, das seis estações meteorológicas selecionadas do Estado do Rio de Janeiro.

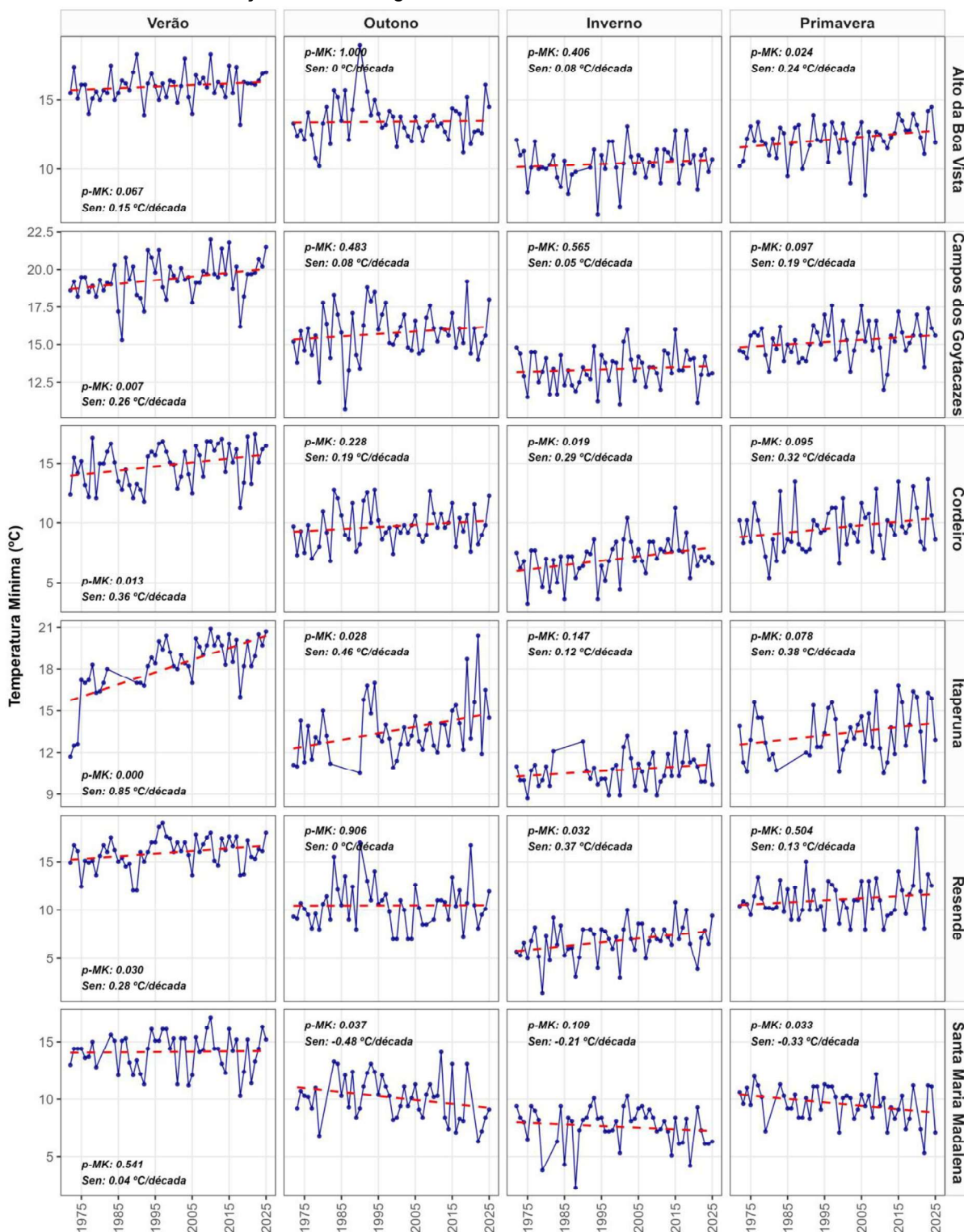


Fonte: Elaboração própria (2026).

A análise dos valores mínimos anuais de temperatura mínima (Figura 20) também indica uma tendência de elevação, com redução da ocorrência de noites

frias nas últimas décadas. Esse comportamento é mais evidente no verão em Itaperuna, Campos dos Goytacazes, Cordeiro e Resende. A elevação das mínimas sugere um processo de aquecimento noturno, que, segundo Gotardo *et al.* (2019) e Silva e Dereczynski (2014), esse fenômeno ocorre porque a supressão da vegetação nativa (evidenciada na Figura 6) altera o balanço de energia superficial, dificultando a liberação do calor armazenado durante o dia e elevando, conseqüentemente, os patamares das temperaturas mínimas.

Figura 20. Série temporal dos valores mínimos anuais de temperatura mínima, por estação do ano, das seis estações meteorológicas selecionadas do Estado do Rio de Janeiro.



Fonte: Elaboração própria (2026).

As Tabelas 3 e 4 sintetizam as tendências climáticas anuais observadas nas séries temporais de precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima,

oferecendo uma visão integrada tanto por variável quanto por estação meteorológica. Os resultados detalhados encontram-se no Apêndice A, que apresenta os valores específicos das estimativas de Sen, dos coeficientes Tau de Mann-Kendall e dos anos de ruptura para cada estação analisada, organizados nas três variáveis: precipitação (Tabela A1), temperatura máxima (Tabela A2) e temperatura mínima (Tabela A3).

Na Tabela 3, observa-se que a precipitação apresenta, em sua maioria, ausência de tendências estatisticamente significativas (nível de 5%), com exceção de alguns casos pontuais no outono (+14,93 mm/década) e inverno (+7,33 mm/década) em Alto da Boa Vista (RGI 01). A análise temporal das rupturas (Teste de Pettitt) indica que a intensificação das chuvas no Alto da Boa Vista (RGI 01) teve um ponto de inflexão estatística em 2004 (Outono). Ao confrontar esses resultados com a evolução do uso da terra (Figura 7), nota-se que a ruptura coincide com o período de maior expansão da área urbanizada (1995–2005).

Os resultados térmicos apontam para um processo sistemático de aquecimento, manifestado em quase todas as estações monitoradas. Esse padrão reforça que os extremos de temperatura constituem um sinal mais robusto das mudanças climáticas regionais do que os extremos de precipitação, refletindo tanto a influência de processos globais quanto de alterações locais no uso e cobertura da terra. Enquanto a precipitação é influenciada por sistemas de larga escala que podem mascarar tendências locais, as temperaturas máxima e mínima ratificam, em escala regional, o fenômeno global descrito pelo IPCC (2021) de aquecimento sem precedentes nos últimos séculos.

A temperatura máxima revela tendências positivas em diferentes estações, com destaque para a primavera, conforme ilustrado na Tabela 3, quando 66,7% das séries analisadas registram aumento significativo ao nível de 5%. A temperatura mínima, por sua vez, mostra elevação mais expressiva no verão (66,7% das estações), evidenciando o processo de aquecimento noturno e a redução da frequência de noites frias.

Tabela 3. Resumo das tendências climáticas anuais por variável e estação do ano, abrangendo os extremos: máximos anuais de precipitação e temperatura máxima, e mínimos anuais de temperatura mínima.

Variável	Estação	TPS (%)	TNS (%)	Sem tend. significativa (%)	Rupturas mais frequentes
Precipitação (mm)	Verão	0,0	0,0	100,0	2000
	Outono	16,7 (Alto da Boa Vista)	0,0	83,3	2004
	Inverno	16,7 (Alto da Boa Vista)	0,0	83,3	1983, 1985
	Primavera	0,0	0,0	100,0	-
Temperatura Máxima (°C)	Verão	16,7 (Itaperuna)	0,0	83,3	2009
	Outono	33,3 (Alto da Boa Vista; Itaperuna)	0,0	66,7	-
	Inverno	16,7 (Itaperuna)	0,0	83,3	1992
	Primavera	66,7 (Itaperuna; Santa Maria Madalena; Cordeiro; Resende)	0,0	33,3	2011, 2010
Temperatura Mínima (°C)	Verão	66,7 (Itaperuna; Campos dos Goytacazes; Cordeiro; Cordeiro; Resende)	0,0	33,3	1992, 1993
	Outono	16,7 (Itaperuna)	16,7 (Santa Maria Madalena)	66,7	-
	Inverno	33,3 (Cordeiro; Resende)	0,0	66,7	1997
	Primavera	16,7 (Alto da Boa Vista)	16,7 (Santa Maria Madalena)	66,7	-

TPS: Tendência positiva estatisticamente significativa ao nível de 5%.

TNS: Tendência negativa estatisticamente significativa ao nível de 5%.

Fonte: Elaboração própria com dados do INMET (2026).

A Tabela 4 evidencia que a estação de Itaperuna (RGI 11) apresenta as taxas de aquecimento mais acentuadas do Estado, com incremento de +0,85 °C/década nas temperaturas mínimas durante o verão e +0,73 °C/década nas temperaturas

máximas na primavera. Esses resultados reforçam a intensificação dos extremos térmicos na região Noroeste Fluminense, destacando Itaperuna como um dos pontos mais críticos do Estado. Essa vulnerabilidade térmica decorre de um processo de retroalimentação entre a compartimentação do relevo e a conversão do uso do solo (IPCC, 2021; Marengo; Tomasella; Nobre, 2017). A localização em área de baixa altitude e tabuleiros (Figura 1) favorece a subsidência do ar sob influência do ASAS, enquanto a predominância de pastagens degradadas (Figura 6) minimiza a regulação térmica por calor latente. Sem a proteção da cobertura vegetal, a energia solar é convertida majoritariamente em calor sensível, o que explica a magnitude das tendências e a precocidade da ruptura térmica registrada já em 2009 (Apêndice A, Tabela A2).

A análise das Tabelas 3 e 4 evidencia dois momentos de ruptura térmica: o primeiro nas temperaturas mínimas durante o verão (1992-1993) e o segundo nas máximas na primavera (2010-2011). Em Itaperuna, destaca-se a precocidade da ruptura registrada em 2009, refletindo a fragilidade ambiental do Noroeste Fluminense. Esta região apresenta o maior histórico de registros oficiais de estiagens no estado, conforme o Atlas de Desastres Naturais de 1991 a 2012 (CEPED/UFSC, 2013). Somando-se a esse histórico, estudos de tendência indicam que o déficit hídrico no Noroeste Fluminense tem se intensificado em frequência e duração (Santos; Santos, 2020).

A vulnerabilidade hídrica crônica da região está associada à predominância de pastagens degradadas, conforme ilustrado na Figura 6, que potencializam a insolação direta e reduzem a umidade do solo. Esse processo favorece o aquecimento por calor sensível e diminui a regulação térmica local, consolidando um regime em que a persistência de dias secos facilita a ocorrência de extremos térmicos mais severos, como as ondas de calor observadas recentemente (Brasil, 2025b; INMET, 2026). O cenário é particularmente alarmante, pois, embora o Noroeste Fluminense possua a menor densidade demográfica do estado (CEPERJ, 2025), a pressão sobre a cobertura vegetal decorrente das pastagens degradadas tem comprometido a resiliência térmica regional.

Tabela 4. Resumo das tendências climáticas anuais por estação meteorológica e estação do ano, abrangendo os extremos: máximos anuais de precipitação e temperatura máxima, e mínimos anuais de temperatura mínima.

Nome	Estação	Variáveis com TPS (Magnitude por década)	Variáveis com TNS (Magnitude por década)	Principais rupturas
Alto da Boa Vista	Verão	-	-	-
	Outono	Precipitação (14,93 mm); Temperatura Máxima (0,33°C)	-	2004
	Inverno	Precipitação (7,33 mm)	-	1985
	Primavera	Temperatura Mínima (0,24°C)	-	-
Campos dos Goytacazes	Verão	Temperatura Mínima (0,26°C)	-	1992
	Outono	-	-	-
	Inverno	-	-	-
	Primavera	-	-	-
Cordeiro	Verão	Temperatura Mínima (0,36°C)	-	1992
	Outono	-	-	-
	Inverno	Temperatura Mínima (0,29°C)	-	1997
	Primavera	Temperatura Máxima (0,44°C)	-	2011
Itaperuna	Verão	Temperatura Máxima (0,45°C); Temperatura Mínima (0,85°C)	-	2009; 1993
	Outono	Temperatura Máxima (0,34°C) Temperatura Mínima (0,46°C)	-	-
	Inverno	Temperatura Máxima (0,42°C)	-	1992
	Primavera	Temperatura Máxima (0,73°C)	-	2011
Resende	Verão	Temperatura Mínima (0,28°C)	-	2009; 1993
	Outono	-	-	-
	Inverno	Temperatura Mínima (0,37°C)	-	-
	Primavera	Temperatura Máxima (0,40°C)	-	2010
Santa Maria Madalena	Verão	-	-	-
	Outono	-	Temperatura Mínima (-0,48°C)	-
	Inverno	-	-	-
	Primavera	Temperatura Máxima (0,35°C)	Temperatura Mínima (0,33°C)	-

TPS: Tendência positiva estatisticamente significativa ao nível de 5%.

TNS: Tendência negativa estatisticamente significativa ao nível de 5%.

Fonte: Elaboração própria com dados do INMET (2026).

As rupturas térmicas identificadas, com destaque para a precocidade dos eventos em Itaperuna (2009) e os recordes nas temperaturas máximas de primavera (2010-2011), sugerem que a velocidade do aquecimento nas áreas de baixada

impõe desafios que antecedem as metas de longo prazo do Plano Estratégico de Desenvolvimento Econômico e Social (PEDES) para o período 2024-2031 (Rio de Janeiro, 2023b). Os resultados reforçam que a mitigação do estresse térmico regional depende da implementação rigorosa das SbN, cujas intervenções vegetativas promovem o resfriamento evaporativo e a regulação térmica ativa. Diferentemente das infraestruturas convencionais, essa abordagem oferece uma resposta multifuncional (Ivanova; Randhir; Randhir, 2025), essencial para reverter o déficit de resiliência detectado e proteger as populações sob forte pressão antrópica.

Contudo, a implementação dessas estratégias, bem como a consequente melhoria nos índices do ICMS Ecológico, encontra obstáculos na carência de suporte técnico municipal para o monitoramento autônomo do território. Essa limitação fundamenta o desenvolvimento do Produto Tecnológico apresentado no Capítulo 5, cujo objetivo é fortalecer a gestão local mediante o uso de dados de sensoriamento remoto processados em informação geoespacial voltada à eficiência fiscal.

5. PRODUTO TECNOLÓGICO

O produto tecnológico derivado desta pesquisa materializa-se na cartilha instrucional intitulada "Guia Metodológico para Processamento de Dados do MapBiomias: do Download à Análise Espacial". Enquadrado na tipologia de Material Didático e Instrucional conforme a classificação de produções técnicas da CAPES, este guia tem como objetivo central democratizar o acesso e a manipulação de dados de sensoriamento remoto, transformando o conhecimento científico gerado nesta dissertação em uma ferramenta prática de baixo custo.

A cartilha apresenta um roteiro lógico e simplificado, orientando o usuário em todas as etapas necessárias para trabalhar com a Coleção 10 de uso e cobertura da terra do MapBiomias Brasil, incluindo o procedimento de download dos dados matriciais, a harmonização de sistemas de referência no software livre QGIS e o cruzamento dessas informações com as malhas territoriais oficiais do IBGE (divisões político-administrativas). Ao focar no uso e cobertura da terra, o material permite que técnicos municipais e pesquisadores extraiam estatísticas precisas sobre a evolução da mancha urbana, das pastagens e das formações florestais em diferentes escalas geográficas.

A relevância deste produto decorre de uma limitação técnica fundamental: a dificuldade enfrentada por gestores e técnicos públicos em acessar, processar e interpretar de forma adequada bases de dados ambientais complexas para subsidiar o planejamento territorial. Muitas administrações locais não dispõem de equipes especializadas em geoprocessamento nem de recursos para contratar consultorias externas, o que resulta em uma dependência de dados secundários, frequentemente desatualizados.

Através de uma linguagem acessível e de um passo a passo visual, a cartilha instrumentaliza o gestor público para realizar análises territoriais autônomas, essenciais para a atualização de Planos Diretores e para a fiscalização de políticas ambientais. A inovação do guia está na transposição de metodologias acadêmicas complexas para um fluxo de trabalho operacionalizável por usuários com conhecimentos básicos em Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

Com potencial de replicação em diferentes contextos regionais do território nacional, o público-alvo abrange gestores de Secretarias Municipais de Meio

Ambiente, consultores, estudantes e professores da educação básica que desejem utilizar dados abertos como ferramenta didática. A implementação será viabilizada por meio da distribuição digital do manual em formato PDF, já disponibilizado no Apêndice B deste trabalho e com previsão de publicação em plataforma de acesso aberto voltada à difusão científica. Dessa forma, o guia se consolida como um subsídio técnico fundamental para a governança baseada em evidências geográficas e para o monitoramento contínuo das transformações territoriais fluminenses.

6. CONCLUSÃO

O presente estudo analisou a degradação ambiental no Estado do Rio de Janeiro, integrando a dinâmica da cobertura vegetal à análise de tendências climáticas extremas. Os resultados permitiram caracterizar a exposição do território fluminense a riscos geoambientais e indicaram que a preservação da Mata Atlântica pode desempenhar papel relevante na regulação da resiliência térmica e hídrica regional.

Em relação à dinâmica da paisagem, a aplicação do Índice de Resiliência Territorial (IRT) evidenciou, no recorte de 2023, um superávit de áreas em processo de regeneração em comparação às áreas suprimidas. No entanto, a análise espacial detalhada indicou um desequilíbrio qualitativo preocupante: enquanto o desmatamento suprime fragmentos de florestas maduras e consolidadas, a recuperação concentra-se em vegetação secundária jovem, com menor funcionalidade ecológica. Identificou-se, ainda, que a pressão antrópica ocorre de forma difusa e pulverizada, transpassando inclusive os limites de Áreas de Proteção Legal, configurando um processo de fragmentação interna que compromete a integridade do bioma.

No âmbito climático, a pesquisa confirmou um aquecimento sistemático e acelerado no estado. As maiores taxas de elevação térmica foram detectadas em regiões marcadas pela alta vulnerabilidade devido à substituição da floresta por pastagens degradadas, como o Noroeste Fluminense. As rupturas estatísticas nas séries de temperatura indicam que a transição para um regime térmico mais severo se consolidou majoritariamente a partir das últimas duas décadas, enquanto os extremos de chuva demonstraram comportamento mais uniforme, com intensificação restrita a áreas de forte influência orográfica.

O produto tecnológico derivado deste trabalho apresenta-se como uma contribuição prática para responder a esse cenário. Ao democratizar o acesso a ferramentas de geoprocessamento, o guia instrumentaliza os gestores e sociedade civil no monitoramento autônomo e contínuo do território, apoiando ações de planejamento urbano-ambiental com alternativas de baixo custo.

Como limitações, apontam-se as lacunas nas séries históricas de algumas estações meteorológicas e o desafio da escala de análise orbital para detectar supressões vegetais em microescala. Sugere-se, para estudos futuros, a realização

de análises climáticas em escala municipal detalhada, bem como a investigação da relação entre os extremos térmicos e indicadores de saúde pública e vulnerabilidade social.

Em suma, este trabalho ressalta que a mitigação dos riscos climáticos e o fortalecimento da resiliência territorial no Estado do Rio de Janeiro dependem da integração entre o planejamento urbano e políticas de conservação e restauração da Mata Atlântica.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, C. *et al.* Governança ambiental no Brasil: acelerando em direção aos objetivos de desenvolvimento sustentável ou olhando pelo retrovisor? **Cadernos Gestão Pública e Cidadania**, São Paulo, v. 25, n. 81, p. 1-13, e-81403, 2020. DOI: <https://doi.org/10.12660/cgpc.v25n81.81403>.

AGUIAR, T. M. C. B. de; ERVATTI, M. Vulnerabilidade costeira frente a mudanças climáticas e políticas públicas na cidade do Rio de Janeiro: estamos prontos? **Novos Cadernos NAEA**, Belém, v. 23, n. 2, p. 161-178, maio/ago. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.5801/ncn.v23i2.7171>.

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711–728, dez. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

ARTAXO, P. COP-30 e o agravamento da crise climática: caminhos para a construção de uma sociedade sustentável. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 39, n. 114, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.202539114.003>.

ARTHUR, M.; SAFFER, D. The orographic effect. In: **EARTH 111: water: science and society**. University Park: The Pennsylvania State University, 2017. Disponível em: <https://courses.ems.psu.edu/earth111/node/751>. Acesso em: 10 out. 2025.

BRASIL. **Lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006**. Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica. Brasília, DF: Presidência da República, 2006. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/l11428.htm. Acesso em: 2 dez. 2025.

BRASIL. **Decreto nº 6.660, de 21 de novembro de 2008**. Regulamenta disposições da Lei no 11.428, de 22 de dezembro de 2006. Brasília, DF: Presidência da República, 2008. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2008/Decreto/D6660.htm. Acesso em: 2 dez. 2025.

BRASIL. **Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012**. Dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC. Brasília, DF: Presidência da República, 2012a. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12608.htm. Acesso em: 27 dez. 2025.

BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. Brasília, DF: Presidência da República, 2012b. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm. Acesso em: 2 dez. 2025.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Clima em síntese: estudos sobre saúde e ondas de calor no Brasil (2015-2025)**. Brasília, DF: MCTI, 2025b.

58 p. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/paginas/clima-em-sintese>. Acesso em: 21 jan. 2026.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Biodiversidade. Departamento de Conservação de Ecossistemas. **Impactos da mudança do clima na Mata Atlântica**. Brasília, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/biodiversidade-e-biomas/biomas-e-ecossistemas/biomas/arquivos-biomas/impactos-da-mudanca-do-clima-na-mata-atlantica.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Biomas**. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/biodiversidade-e-biomas/biomas-e-ecossistemas/biomas>. Acesso em: 28 abr. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas na Mata Atlântica (PPMata Atlântica): 2025 a 2027**. Brasília, DF: MMA, 2025a. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/controle-ao-desmatamento-queimadas-e-ordenamento-ambiental-territorial/controle-do-desmatamento-1/ppmata-atlantica/PPMata_Atlantica_2025_internet_final.pdf. Acesso em: 28 nov. 2025.

BRASILIENSE, C. S. *et al.* Climatologias da temperatura do ar e da precipitação na Bacia do Rio Paraíba do Sul, Região Sudeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências** - UFRJ, Rio de Janeiro, v. 43, n. 1, p. 355-365, 2020. DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2020_1_355_365.

BUENO, R. R.; VALERIANO, D. de M. Análise da dinâmica florestal da Mata Atlântica para valorar o balanço de emissão e sequestro de GEE em escala municipal. **Revista Foco**, Curitiba, v. 17, n. 4, e4970, 2024. DOI: <https://doi.org/10.54751/revistafoco.v17n4-142>.

CAMPANILI, M.; PROCHNOW, M. (Org.). **Mata Atlântica: uma rede pela floresta**. Brasília: Rede Mata Atlântica (RMA), 2006. 332 p. Disponível em: <https://apremavi.org.br/wp-content/uploads/2022/04/mata-atlantica-uma-rede-pela-floresta.pdf>. Acesso em: 5 nov. 2025.

CARDOSO, J. T. A Mata Atlântica e sua conservação. **Revista Eletrônica de Extensão e Tecnologia**, [S.l.], v. 31, n. 3, p. 1-13, 2016. DOI: <https://doi.org/10.46525/ret.v31i3.509>.

CARVALHO, G. O. T. de; SILVA, N. C. da; SALVIO, G. M. M. Vulnerabilidade ambiental em Áreas de Proteção Ambiental (APA) do Bioma Mata Atlântica na região sudeste brasileira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 32, n. 3, p. 1575-1593, jul./set. 2022. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509867261>.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, Form, Persistence, and Relationships with Intraseasonal to Interannual Activity and Extreme Rainfall. **Journal of Climate**, Boston, v. 17, n. 1, p. 88-108, 2004. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<0088:TSACZI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<0088:TSACZI>2.0.CO;2).

CEPED/UFSC – Centro Universitário De Estudos E Pesquisas Sobre Desastres. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 a 2012**: Volume Rio de Janeiro. 2. ed. rev. e ampl. Florianópolis: CEPED UFSC, 2013. 116 p. Disponível em: https://www.ceped.ufsc.br/wp-content/uploads/2024/08/RIODEJANEIRO_mioloWEB.pdf. Acesso em: 20 jan. 2026.

CEPERJ. Fundação Centro Estadual de Estatísticas, Pesquisas e Formação de Servidores Públicos do Rio de Janeiro. **ICMS Ecológico: Índice Final de Conservação Ambiental (IFCA): Ano Fiscal 2026**. Rio de Janeiro: CEPERJ, 2025. Disponível em: <https://www.rj.gov.br/ceperj/icms-ecologico>. Acesso em: 5 abr. 2026.

CHAZDON, R. Regeneração de florestas tropicais. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais**, Belém, v. 7, n. 3, p. 195-218, set.-dez. 2012. DOI: <https://doi.org/10.46357/bcnaturais.v7i3.587>.

CLEMENTE, S. S.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. F.; LOUZADA, M. A. P. Focos de calor do bioma Mata Atlântica no estado do Rio de Janeiro: uma abordagem de gestão e legislação ambiental. **Revista de Ciências Agroambientais**, Alta Floresta, MT, v. 15, p. 158-174, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5327/Z1677-606220172240>.

COELHO, M. A. N. *et al.* Flora of Rio de Janeiro state: an overview of Atlantic Forest diversity. **Rodriguésia**, Rio de Janeiro, v. 68, n. 1, p. 001-011, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/2175-7860201768101>.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DOS RIOS MACAÉ E DAS OSTRAS. **PRH-MACAÉ/OSTRAS**: relatório de caracterização da região hidrográfica Macaé e das Ostras (RD-01): versão final revisada. [S.l.], 2012. Disponível em: <https://cbhmacae.eco.br/wp-content/uploads/2020/03/RD-01-Relat%C3%B3rio-de-Caracteriza%C3%A7%C3%A3o-da-%C3%81rea-do-Estudo.pdf>. Acesso em: 10 out. 2025.

CPTEC/INPE. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos; Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Climanálise**: boletim de monitoramento e análise climática. Cachoeira Paulista, SP: INPE/CPTEC, v. 19, n. 1, jan. 2004. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/pdf/pdf04/jan04.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2026.

DANTAS, M. E.; FERREIRA, C. E. O.; SHINZATO, E. Relevô. In: PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. dos; SILVA NETO, E. C. da (eds.). **Solos do Rio de Janeiro**: gênese, classificação e limitações ao uso agrícola. Ponta Grossa, PR: Atena, 2023. Cap. 2. p. 19-41. DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.2732325102..>

DOURADO, F.; ARRAES, T. C.; SILVA, M. F. e. O megadesastre da Região Serrana do Rio de Janeiro: as causas do evento, os mecanismos dos movimentos de massa e a distribuição espacial dos investimentos de reconstrução no pós-desastre. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, Rio de Janeiro, v. 35, n. 2, p. 43-54, 2012. DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2012_2_43-54.

FARIA, V. G. de *et al.* **O Código Florestal na Mata Atlântica**. Piracicaba, SP: Imaflora; ESALQ/USP, 2021. (Sustentabilidade em Debate, 11). Disponível em: <https://www.imaflora.org/biblioteca?page=1&pesquisa=O+C%C3%B3digo+Florestal+na+Mata+Atl%C3%A2ntica&categorias%5B%5D=publicacao&categorias%5B%5D=relatorio>. Acesso em: 22 dez. 2025.

FERREIRA, V. Serviços ecossistêmicos: o papel fundamental dos rios. **Revista de Ciência Elementar**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 1-11, mar. 2024. DOI: <http://doi.org/10.24927/rce2024.005>.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA. **Mata Atlântica**. São Paulo, 2026. Disponível em: <https://www.sosma.org.br/causas/mata-atlantica/>. Acesso em: 06 jan. 2026.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA; INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica: período 2022-2023**. São José dos Campos: INPE, 2024. Disponível em: <http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGP3W34T/4C2JEEE>. Acesso em: 31 maio 2024.

GIORGI, F. Climate change hot-spots. **Geophysical Research Letters**, [s. l.], v. 33, n. 8, p. L08707, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1029/2006GL025734>.

GIRÃO, I. R. F; RABELO, D. R; ZANELLA, M. E. Análise teórica dos conceitos: Riscos Socioambientais, Vulnerabilidade e Suscetibilidade. **REGNE**, [s. l.], v. 4, n. esp., p. 71-82, 2018. DOI: <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2018v4n0ID13273>.

GIRÃO, R. *et al.* Mapa Geomorfológico do Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 15, n. 1, p. 155-175, mar. 2022. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.1.p155-175>.

GOTARDO, R, *et al.* Comparação entre variáveis microclimáticas de local aberto e florestal em um bioma da Mata Atlântica, sul do Brasil. **Ciência Florestal**, [S. l.], v. 29, n. 3, p. 1415–1427, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509834832>.

IBGE. **Biomass e Sistema Costeiro-Marinho do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024a. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/apps/biomass/pdf/Lim08_BiomSist.pdf. Acesso em: 10 set. 2024.

IBGE. **Cidades e estados**: Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: IBGE, 2024b. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rj.html>. Acesso em: 12 abr. 2024.

IBGE. **Divisão Regional do Brasil em Regiões Geográficas Imediatas e Regiões Geográficas Intermediárias 2017**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. 83 p. Disponível em: https://atlasnf.uff.br/?page_id=7146. Acesso em: 11 set. 2025.

IBGE. **Malhas territoriais**: Malha de municípios e divisões regionais do Brasil. Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 18 abr. 2025.

IBGE. **País tem 90 milhões de domicílios, 34% a mais que em 2010**. Agência de Notícias, 28 jun. 2023. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia->

noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/37238-pais-tem-90-milhoes-de-domicilios-34-a-mais-que-em-2010. Acesso em: 06 jan. 2026.

INEA. **GeoPortal do INEA**. Rio de Janeiro, [2025]. Disponível em: <https://geoportal.inea.rj.gov.br/portal/apps/experiencebuilder/experience/?id=d40de9b2dd2243ccb777971cef2eb14e>. Acesso em: 20 set. 2025.

INEA. **Plano Municipal da Mata Atlântica - Estado do Rio de Janeiro**: 50 municípios do Estado do RJ possuem seus Planos Municipais de Conservação e Recuperação da Mata Atlântica (PMMA). Elaboração: Superintendência de Gestão Ecológica. Rio de Janeiro, [2024]. Disponível em: <https://geoportal.inea.rj.gov.br/portal/apps/storymaps/stories/fcd21d3b5451480ba0ed45615279219b>. Acesso em: 2 dez. 2025.

INEA. **Resolução CERHI n. 107, de 22 de maio de 2013**. Aprova nova definição das regiões hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro. [S.l.]: INEA, 2013. Disponível em: <https://www.comiteguandu.org.br/legislacoes/ResolucoesCERHI/Resolucao-CERHI-107.pdf>. Acesso em: 29 out. 2024.

INMET. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP)**. Brasília, DF, 2025. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 20 set. 2025.

INMET. **Destaques meteorológicos de dezembro de 2025 no Brasil**. Brasília, DF: 7 jan. 2026. Nota técnica. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/notasTecnicas>. Acesso em: 20 fev. 2026.

IPCC. **Mudança do clima 2023**: relatório síntese. [S.l.]: IPCC, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf. Acesso em: 15 abr. 2024.

IPCC. Resumo para formuladores de políticas. In: MASSON-DELMOTTE, Valérie *et al.* **Mudanças climáticas 2021**: a base da ciência física. Contribuição do Grupo de Trabalho I para o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/IPCC_mudanca2.pdf. Acesso em: 15 abr. 2024.

IVANOVA, A.; RANDHIR, R.; RANDHIR, T. O. Nature-Based Solutions for Resilience: A Global Review of Ecosystem Services from Urban Forests and Cover Crops. *Diversity*, v. 18, n. 47, p. 1-25, 2026. DOI: <https://doi.org/10.3390/d18010047>.

JOLY, C. A.; METZGER, J. P.; TABARELLI, M. Experiences from the Brazilian Atlantic Forest: ecological findings and conservation initiatives. *New Phytologist*, [s.l.], v. 204, n. 3, p. 459-473, 2014. DOI: 10.1111/nph.12989.

KENDALL, M. G. **Rank Correlation Methods**. 4 ed. London: Charles Griffin, 1975.

LIMA, R. A. F. de *et al.* Comprehensive conservation assessments reveal high extinction risks across Atlantic Forest trees. **Science**, Washington, D.C., v. 383, n. 6679, p. 219–225, jan. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.abq5099>.

LUIZ-SILVA, W. *et al.* An overview of precipitation climatology in Brazil: space-time variability of frequency and intensity associated with atmospheric systems. **Hydrological Sciences Journal**, [s. l.], v. 66, n. 2, p. 289-308, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1863969>.

LUIZ-SILVA, W.; OSCAR-JÚNIOR, A. C. Climate extremes related with rainfall in the State of Rio de Janeiro, Brazil: a review of climatological characteristics and recorded trends. **Natural Hazards**, Cham, v. 114, p. 713-732, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05409-5>.

MACHADO, R. L. *et al.* Spatial variability of maximum annual daily rain under different return periods at the Rio de Janeiro state, Brazil. Rio de Janeiro. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 1, p. 77-84, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052010000500009>.

MALAFAIA, J. P.; MIRANDA, A. C. de; GOMES, H. P. A bacia do rio Paraíba do Sul: cenário de uma atividade de EA a partir de problemas ambientais. **Revista Científica ANAP Brasil**, São Paulo, v. 5, n. 5, p. 1-15, jul. 2012. DOI: <https://doi.org/10.17271/19843240552012394>.

MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica**, [S.l.]: Econometric Society, v. 13, n. 3, p. 245–259, jul. 1945. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/1907187?seq=1>. Acesso em: 6 jan. 2025.

MAPBIOMAS. **Em 2023, a perda de áreas naturais no Brasil atinge a marca de 33% do território.** [S.l.], 2024. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/2024/08/21/em-2023-a-perda-de-areas-naturais-no-brasil-atinge-a-marca-historica-de-33-do-territorio/>. Acesso em: 18 abr. 2025.

MAPBIOMAS. **Manual Geral do MapBiomias**: Documento de Base Teórica do Algoritmo (ATBD) - Coleção 10.1. Versão 3.0. [S. l.]: MapBiomias, 2026. DOI: <https://doi.org/10.58053/MapBiomias/2XSLB3>.

MARAFON, G. J. Transformações no espaço rural fluminense: o papel da agricultura familiar e das atividades turísticas. In: MARAFON, G. J.; RIBEIRO, M. A. (org.). **Revisitando o território fluminense, VI**. Rio de Janeiro: EDUERJ, 2017. p. 105-121. DOI: <https://doi.org/10.7476/9788575114575.0007>.

MARENGO, J. A. *et al.* A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. **Revista USP**, São Paulo, n. 106, p. 31-44, set./nov. 2015. DOI: <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i106p31-44>.

MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; NOBRE, C. A. Mudanças climáticas e recursos hídricos. In: DE MATTOS BICUDO, C. *et al.* (ed.). **Águas do Brasil**. Cham: Springer, 2017. cap. 12. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-41372-3_12.

MARQUES, M. C. M. *et al.* The Atlantic Forest: an introduction to the megadiverse forest of South America. In: MARQUES, M. C. M.; GRELLER, C. E. V. (eds.). **The Atlantic Forest: history, biodiversity, threats and opportunities of the megadiverse forest**. Cham, Switzerland: Sping Nature, 2021. p. 3-23. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-55322-7_1.

MARTINS, F. C. H. H. *et al.* Mata Atlântica: A formação original à fragmentação e o atual estado de conservação em Santa Catarina. **Estrabção**, [S.l.], v. 2, p. 188–191, dez. 2021. DOI: <https://doi.org/10.53455/re.v2i.45>.

MONTEIRO, J. B.; ZANELLA, M. E. A metodologia estatística dos eventos extremos de precipitação: uma proposta autoral para análise de episódios pluviométricos diários. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S. l.], v. 32, n. 19, p. 494–516, 2023. DOI: 10.55761/abclima.v32i19.16323.

MYERS, N. *et al.* Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, n. 6772, p. 853-858, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1038/35002501>.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Mudanças climáticas ameaçam progresso no desenvolvimento sustentável**. Nações Unidas Brasil, 09 jul. 2019. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/83654-mudan%C3%A7as-clim%C3%A1ticas-amea%C3%A7am-progresso-no-desenvolvimento-sustent%C3%A1vel#:~:text=Condi%C3%A7%C3%B5es%20clim%C3%A1ticas%20e%20xtremas%2C%20desastres%20naturais,pobreza%2C%20deslocamento%20e%20de%20sigualdades%20crescentes>. Acesso em: 20 dez. 2024.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552 p. ISBN 978-85-7499-023-1.

NHANTUMBO, B. G. *et al.* Dinâmica temporal da cobertura e uso da terra do Estado De Rio De Janeiro utilizando Mapbiomas entre os anos 2000 a 2023. **Contribuciones a Las Ciencias Sociales**, São José dos Pinhais, v. 18, n. 2, p. 01-12, 2025. DOI: <https://doi.org/10.55905/revconv.18n.2-401>.

NOBRE, C. A. *et al.* **Mudanças climáticas e possíveis alterações nos biomas da América do Sul**: relatório nº 6. São José dos Campos: CPTEC/INPE; Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2007. Disponível em: http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/prod_probio/Relatorio_6.pdf. Acesso em: 20 abr. 2024.

OLIVEIRA, E. F. C. de; ALVES, D.; FERREIRA, M. I. P. A efetividade das ações de fiscalização da Polícia Militar Ambiental do Estado do Rio de Janeiro. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, Campos dos Goytacazes, v. 12, n. 1, p. 147-164, jan./jun. 2018. DOI: <https://doi.org/10.19180/2177-4560.v12n12018p147-164>.

OMM (ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL). **Guide to Climatological Practices** (WMO-No. 100). Genebra: OMM, 2023. Disponível em: <https://library.wmo.int/viewer/60113>. Acesso em: 7 abr. 2026.

PEIXE, S. P.; MELLO, R. S. P. Planos municipais de mata atlântica: aspectos legais, desafios e possibilidades à sua elaboração e implementação. **Revista Eletrônica Científica da UERGS**, v. 6, n. 3, p. 259-277, dez. 2020. DOI: <https://doi.org/10.21674/2448-0479.63.259-277>.

PENEREIRO, J. C.; MARTINS, L. L. S.; BERETTA, V. Z. Identificação de variabilidades e tendências interanuais em medidas hidro-climáticas na região hidrográfica do Tocantins-Araguaia, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S. l.], v. 18, p. 219-241, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5380/abclima.v18i0.38840>.

PEREIRA, V. R.; RODRIGUEZ, D. A. Vulnerabilidades da segurança hídrica no Brasil frente às mudanças climáticas. **Derbyana**, São Paulo, v. 43, e777, 2022. DOI: [10.14295/derb.v43.777](https://doi.org/10.14295/derb.v43.777).

PETTITT, A. N. A non-parametric approach to the change-point problem. **Applied Statistics**, [S. l.], v. 28, n. 2, p. 126-135, 1979. DOI: <https://doi.org/10.2307/2346729>.

PIMENTA, P. **Bioma mais devastado, Mata Atlântica luta para manter a biodiversidade**. Agência Senado, Brasília, 12 jan. 2024. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/infomaterias/2024/01/bioma-mais-devastado-mata-atlantica-luta-para-manter-biodiversidade>. Acesso em: 15 out. 2024.

PROJETO MAPBIOMAS. **Coleção 9.0 e 10 da série anual de mapas de cobertura e uso de solo do Brasil**. [S.l.]: MapBiomas, 2025. Disponível em: <https://mapbiomas.org/>. Acesso em: 15 abr. 2025.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 07 jan. 2026.

REZENDE, C. L. *et al.* From hotspot to hopespot: An opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. **Perspectives in ecology and conservation**, v. 16, n. 4, p. 208-214, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2018.10.002>.

RIBEIRO, M. C. *et al.* The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological conservation**, v. 142, n. 6, p. 1141-1153, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.02.021>.

RIO DE JANEIRO (Estado). **Decreto nº 46.884, de 18 de dezembro de 2019**. Regulamenta a Lei nº 5.100, de 04 de outubro de 2007, que fixa critérios para repartição com os municípios da parcela de 2,5% do ICMS. Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro: parte 1, Rio de Janeiro, n. 235, p. 1-5, 19 dez. 2019.

RIO DE JANEIRO (Estado). Secretaria de Estado de Planejamento e Gestão. **Plano Estratégico de Desenvolvimento Econômico e Social do Estado do Rio de Janeiro (PEDES 2024-2031)**. Rio de Janeiro: SEPLAG, 2023b. Disponível em: <https://transparencia.alerj.rj.gov.br/section/report/115>. Acesso em: 20 jan. 2026.

RIO DE JANEIRO (Estado). Secretaria de Estado do Ambiente; Instituto Estadual Do Ambiente. **O estado do ambiente**: indicadores ambientais do Rio de Janeiro 2010.

Rio de Janeiro: SEA; INEA, 2011. 168 p. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Francisco_Dourado/publication/299811985_O_estado_do_ambiente_indicadores_ambientais_do_Rio_de_Janeiro/links/570ba29908ae8883a1ffd070/O-estado-do-ambiente-indicadores-ambientais-do-Rio-de-Janeiro.pdf. Acesso em: 15 out. 2025.

RIO DE JANEIRO (Estado). Secretaria de Estado do Ambiente; Instituto Estadual do Ambiente. **Plano de Adaptação Climática do Estado do Rio de Janeiro**: relatório final. Rio de Janeiro: SEA; INEA, 2018. Disponível em: <https://www.iis-rio.org/wp-content/uploads/2021/11/PAERJ-Relato%CC%81rio-Final-compactado.pdf>. Acesso em: 20 out. 2025.

RIO DE JANEIRO (Estado). Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade. **Programa Olho no Verde**: monitoramento e fiscalização. Rio de Janeiro: SEAS, 2023a. Disponível em: <https://www.rj.gov.br/seas/Olho-no-Verde>. Acesso em: 2 dez. 2025.

RODRIGUES, A. B. *et al.* Cidades costeiras e mudanças climáticas: uma análise dos impactos e ações governamentais em cidades brasileiras. In: **Simpósio de Recursos Hídricos Do Nordeste, 16.; Simpósio De Hidráulica E Recursos Hídricos dos Países De Língua Portuguesa, 15.**, 2022, Caruaru. Anais [...]. Porto Alegre: ABRHidro, 2022. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=14127#:~:text=Dentre%20as%20regi%C3%B5es%20do%20globo,aumento%20do%20n%C3%ADvel%20do%20mar>. Acesso em: 24 mar. 2026.

ROSA, M. R. *et al.* A destruição oculta de florestas antigas ameaça a Mata Atlântica brasileira e coloca em risco os programas de restauração. **Science Advances**, Washington, D.C., v. 7, n. 4, 20 jan. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.abc4547>.

SANTOS, G. D. R. N.; SANTOS, E. B. Análise das Secas nas Regiões Norte e Noroeste Fluminense. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, Rio de Janeiro, v. 43, n. 4, p. 1-10, 2020. DOI: https://doi.org/10.11137/2020_4_01_10.

SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. **Journal of the American Statistical Association**, [S.l.], v. 63, n. 324, p. 1379–1389, dez. 1968. DOI: <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>.

SILVA NETO, A. R. da; RIBEIRO, A. C. G.; RODRIGUES, R. de Á. Preservação ambiental em bacias hidrográficas: legislações, mapeamento e recuperação. **Contribuciones a las Ciencias Sociales**, São José dos Pinhais, v. 17, n. 9, e204, 2024. DOI: <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.9-204>.

SILVA, W. L.; DEREZYNSKI, C. P. Caracterização climatológica e tendências observadas em extremos climáticos no estado do Rio de Janeiro. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 37, n. 2, p. 123-138, 2014. DOI: https://doi.org/10.11137/2014_2_123_138.

SNEYERS, R. On the statistical analysis of series of observations. Technical Note No. 143. Geneva: **World Meteorological Organization**, 1990. 192 p. (WMO-No. 415). Disponível em: <https://library.wmo.int/idurl/4/30743>. Acesso em: 12 jan. 2026.

SOBRAL, B. S. *et al.* Variabilidade espaço-temporal e interanual da chuva no estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 22, p. 281–308, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5380/abclima.v22i0.55592>.

SOUZA, C. M. *et al.* **Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine**. Remote Sensing, v. 12, n. 17, p. 2735, 2020. DOI: 10.3390/rs12172735.

TAVARES, M. G.; SANTOS, E. B. Período de retorno das precipitações máximas diárias no estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, Dourados, MS, v. 30, n. 18, p. 274–290, 2022. DOI: <https://doi.org/10.55761/abclima.v30i18.15196>.

TEIXEIRA, D. L. S. *et al.* Bioma Mata Atlântica: análise temporal da pressão antrópica em unidade de conservação de proteção integral e seu entorno. **Entre-Lugar**, Dourados, v. 13, n. 26, p. 61-90, dez. 2022. DOI: <https://doi.org/10.30612/rel.v13i26.16438>.

TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS: ABRH, 2001.

VALE, M. M. *et al.* Climate change and biodiversity in the Atlantic Forest: best climatic models, predicted changes and impacts, and adaptation options. In: **The Atlantic forest: History, biodiversity, threats and opportunities of the mega-diverse forest**. Cham: Springer International Publishing, 2021. p. 253-267. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-55322-7_12.

VERDAN, I. Zona de Convergência do Atlântico Sul: uma revisão sistemática e de discurso. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S. l.], v. 36, n. 21, p. 313–339, 2025. DOI: 10.55761/abclima.v36i21.19013.

VIANA, J. F. de S. *et al.* Land Use and Land Cover Trends and Their Impact on Streamflow and Sediment Yield in a Humid Basin of Brazil's Atlantic Forest Biome. **Diversity**, v. 15, n. 12, p. 1220, 2023. DOI: 10.3390/d15121220.

WREGGE, M. S. *et al.* Variáveis climáticas relacionadas aos serviços ambientais: estudo de caso da araucária. In: PARRON, L. M. *et al.* (ed.). **Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. Cap. 19, p. 242-247. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1024509>. Acesso em: 09 jan. 2025.

YOUNG, C. E. F.; AGUIAR, C.; POSSAS, E. Perdas Econômicas dos Desastres Climáticos no Estado do Rio de Janeiro, 2001-2010. **Cadernos do Desenvolvimento Fluminense**, Rio de Janeiro, n. 5, p. 19–30, 2014. DOI: <https://doi.org/10.12957/cdf.2014.14228>.

APÊNDICE A – RESULTADOS DAS TENDÊNCIAS CLIMÁTICAS

Tabela A1. Resultados das tendências climáticas referentes aos valores máximos anuais de precipitação diária, analisados por estação do ano, nas seis estações meteorológicas selecionadas do Estado do Rio de Janeiro.

Nome	Variável	Estação	Tau MK	Estimador de Sen (por década)	Ano de ruptura
Alto da Boa Vista	Precipitação (mm)	Verão	119	4,15	1995
Alto da Boa Vista	Precipitação (mm)	Outono	328 *	14,98 *	2004 *
Alto da Boa Vista	Precipitação (mm)	Inverno	258 *	7,33 *	1985 *
Alto da Boa Vista	Precipitação (mm)	Primavera	-113	-3,13	2007
Itaperuna	Precipitação (mm)	Verão	83	1,83	2001
Itaperuna	Precipitação (mm)	Outono	-56	-1,11	2014
Itaperuna	Precipitação (mm)	Inverno	-105	-1,5	2005
Itaperuna	Precipitação (mm)	Primavera	-71	-1,11	2022
Santa Madalena	Maria Precipitação (mm)	Verão	65	0,76	1988
Santa Madalena	Maria Precipitação (mm)	Outono	184	3,71	2003
Santa Madalena	Maria Precipitação (mm)	Inverno	150	1,52	2002
Santa Madalena	Maria Precipitação (mm)	Primavera	-147	-3	1979
Campos Goytacazes	dos Precipitação (mm)	Verão	120	2,97	2000
Campos Goytacazes	dos Precipitação (mm)	Outono	170	4	2004
Campos Goytacazes	dos Precipitação (mm)	Inverno	74	1,15	2011

Nome	Variável	Estação	Tau MK	Estimador de Sen (por década)	Ano de ruptura
Campos dos Goytacazes	Precipitação (mm)	Primavera	-1	0	2004
Cordeiro	Precipitação (mm)	Verão	45	1	1993
Cordeiro	Precipitação (mm)	Outono	-143	-2,8	1996
Cordeiro	Precipitação (mm)	Inverno	-78	-1,11	1983
Cordeiro	Precipitação (mm)	Primavera	-32	-0,68	2009
Resende	Precipitação (mm)	Verão	59	2,36	1999
Resende	Precipitação (mm)	Outono	-155	-3,96	2000
Resende	Precipitação (mm)	Inverno	77	0,76	1998
Resende	Precipitação (mm)	Primavera	-3	-0,11	2017

Tabela A2. Resultados das tendências climáticas referentes aos valores máximos anuais de temperatura máxima diária, analisados por estação do ano, nas seis estações meteorológicas selecionadas do Estado do Rio de Janeiro.

Nome	Variável	Estação	Tau MK	Estimador de Sen (por década)	Ano de ruptura
Alto da Boa Vista	Temperatura Máxima (°C)	Verão	222	0,19	2011
Alto da Boa Vista	Temperatura Máxima (°C)	Outono	315 *	0,33 *	1988
Alto da Boa Vista	Temperatura Máxima (°C)	Inverno	160	0,22	2014
Alto da Boa Vista	Temperatura Máxima (°C)	Primavera	154	0,18	2011

Nome	Variável	Estação	Tau MK	Estimador de Sen (por década)	Ano de ruptura
Itaperuna	Temperatura Máxima (°C)	Verão	348 *	0,45 *	2009 *
Itaperuna	Temperatura Máxima (°C)	Outono	244 *	0,34 *	2008
Itaperuna	Temperatura Máxima (°C)	Inverno	252 *	0,42 *	1992 *
Itaperuna	Temperatura Máxima (°C)	Primavera	386 *	0,73 *	2011 *
Santa Madalena	Maria Temperatura Máxima (°C)	Verão	212	0,17	2009
Santa Madalena	Maria Temperatura Máxima (°C)	Outono	48	0,05	1993
Santa Madalena	Maria Temperatura Máxima (°C)	Inverno	30	0	1974
Santa Madalena	Maria Temperatura Máxima (°C)	Primavera	264 *	0,35 *	2011
Campos Goytacazes	dos Temperatura Máxima (°C)	Verão	54	0,04	1983
Campos Goytacazes	dos Temperatura Máxima (°C)	Outono	153	0,13	1989
Campos Goytacazes	dos Temperatura Máxima (°C)	Inverno	-31	0	2007
Campos Goytacazes	dos Temperatura Máxima (°C)	Primavera	72	0,12	2006
Cordeiro	Temperatura Máxima (°C)	Verão	149	0,12	2009
Cordeiro	Temperatura Máxima (°C)	Outono	130	0,08	2008

Nome	Variável	Estação	Tau MK	Estimador de Sen (por década)	Ano de ruptura
Cordeiro	Temperatura Máxima (°C)	Inverno	-90	-0,07	2007
Cordeiro	Temperatura Máxima (°C)	Primavera	392 *	0,44 *	2011 *
Resende	Temperatura Máxima (°C)	Verão	192	0,13	2009 *
Resende	Temperatura Máxima (°C)	Outono	139	0,15	2004
Resende	Temperatura Máxima (°C)	Inverno	81	0,12	2004
Resende	Temperatura Máxima (°C)	Primavera	316 *	0,4 *	2010 *

Tabela A3. Resultados das tendências climáticas referentes aos valores mínimos anuais de temperatura mínima diária, analisados por estação do ano, nas seis estações meteorológicas selecionadas do Estado do Rio de Janeiro.

Nome	Variável	Estação	Tau MK	Estimador de Sen (por década)	Ano de ruptura
Alto da Boa Vista	Temperatura Mínima (°C)	Verão	239	0,15	2005
Alto da Boa Vista	Temperatura Mínima (°C)	Outono	-1	0	1982
Alto da Boa Vista	Temperatura Mínima (°C)	Inverno	103	0,08	1996
Alto da Boa Vista	Temperatura	Primavera	395 *	0,24 *	2012

Nome	Variável	Estação	Tau MK	Estimador de Sen (por década)	Ano de ruptura
	Mínima (°C)				
Itaperuna	Temperatura Mínima (°C)	Verão	530 *	0,85 *	1993 *
Itaperuna	Temperatura Mínima (°C)	Outono	240 *	0,46 *	2011
Itaperuna	Temperatura Mínima (°C)	Inverno	159	0,12	2000
Itaperuna	Temperatura Mínima (°C)	Primavera	193	0,38	2014
Santa Madalena	Maria Temperatura Mínima (°C)	Verão	76	0,04	1992
Santa Madalena	Maria Temperatura Mínima (°C)	Outono	-235 *	-0,48 *	1998
Santa Madalena	Maria Temperatura Mínima (°C)	Inverno	-192	-0,21	2009
Santa Madalena	Maria Temperatura Mínima (°C)	Primavera	-255 *	-0,33 *	1998
Campos Goytacazes	dos Temperatura Mínima (°C)	Verão	360 *	0,26 *	1992 *
Campos Goytacazes	dos Temperatura Mínima (°C)	Outono	95	0,08	1990
Campos Goytacazes	dos Temperatura Mínima (°C)	Inverno	78	0,05	2000
Campos Goytacazes	dos Temperatura Mínima (°C)	Primavera	223	0,19	1991
Cordeiro	Temperatura Mínima (°C)	Verão	335 *	0,36 *	1992 *
Cordeiro	Temperatura	Outono	158	0,19	1982

Nome	Variável	Estação	Tau MK	Estimador de Sen (por década)	Ano de ruptura
	Mínima (°C)				
Cordeiro	Temperatura Mínima (°C)	Inverno	306 *	0,29 *	1997 *
Cordeiro	Temperatura Mínima (°C)	Primavera	218	0.32	1991
Resende	Temperatura Mínima (°C)	Verão	291 *	0,28 *	1993 *
Resende	Temperatura Mínima (°C)	Outono	16	0	1997
Resende	Temperatura Mínima (°C)	Inverno	273 *	0,37 *	1989
Resende	Temperatura Mínima (°C)	Primavera	88	0,13	2014