



CURSO DE GEOGRAFIA BACHARELADO
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**APLICAÇÃO DE GEOTECNOLOGIAS NA IDENTIFICAÇÃO E
ANÁLISE DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL EM
TERESÓPOLIS (RJ)**

MARIA EDUARDA GUIMARÃES DA SILVEIRA

SÃO JOÃO DEL-REI, MINAS GERAIS, 2025.

MARIA EDUARDA GUIMARÃES DA SILVEIRA

**APLICAÇÃO DE GEOTECNOLOGIAS NA IDENTIFICAÇÃO E
ANÁLISE DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL EM
TERESÓPOLIS (RJ)**

Trabalho apresentado como requisito parcial para a Conclusão do Curso de Geografia - Bacharelado da Universidade Federal de São João Del Rei.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Gabriel Pereira
Universidade Federal de São João Del Rei

Prof. M.a Raquel de Cássia Ramos
Universidade de São Paulo

M.e João Batista Ferreira Neto

São João Del Rei, 14 de novembro de 2025.

DEDICATÓRIA

A Deus, por me sustentar quando tudo parecia desabar, por me dar coragem quando faltou força e por me lembrar que fé e persistência abrem qualquer caminho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade de chegar até aqui, pela força nos momentos difíceis e pela inspiração para seguir em frente, mesmo quando o caminho parecia incerto.

Agradeço à minha família pelo apoio incondicional e por acreditarem em mim, mesmo quando eu duvidava.

Registro ainda minha gratidão à Wania, auxiliar administrativa do departamento, pelo apoio constante, pela disponibilidade e por sempre encontrar um jeito de ajudar em cada etapa desta jornada.

E, acima de tudo, agradeço à vida, por me oferecer novas oportunidades e caminhos sempre que tudo parecia perder o sentido.

A todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho, minha sincera gratidão.

EPÍGRAFE

“Renda-se, como eu me rendi. Mergulhe no que você não conhece como eu mergulhei. Não se preocupe em entender, viver ultrapassa qualquer entendimento.” – Clarice Lispector

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	3
AGRADECIMENTOS	4
EPÍGRAFE.....	5
RESUMO	9
ABSTRACT	10
2. ÁREA DE ESTUDO.....	14
3. MATERIAIS E MÉTODOS	15
3.1 Base de Dados Utilizada	15
3.1.1 Índices Pluviométricos (INMET)	15
3.1.2 Aquisição dos dados orbitais.....	16
3.1.2 Dados complementares e base cartográfica	16
3.2 Métodos	18
3.2.1 Pré-processamento e cálculo dos índices espectrais	18
3.2.2 Análises geológicas, geomorfológicas e pedológicas.....	18
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
4.1 Análise Pluviométrica (2000–2024)	20
4.2 Evolução da cobertura vegetal (NDVI) – 2000 a 2025	22
4.3 Evolução da expansão urbana (NDBI) – 2000 a 2025.....	28
4.4 Análise Geomorfológica, Geológica e Pedológica Integrada.....	33
4.3.1 Análise Geomorfológica	33
.....	34
4.3.2 Análise Geológica.....	35
4.3.3 Análise Pedológica	38
4.3.4 Análise de Declividade.....	40
5. CONCLUSÃO	43
6. REFERÊNCIAS	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Deslizamentos Autor: Marino Azevedo/Governo do Estado do Rio de Janeiro.....	12
Figura 2 - Deslizamento de Rochas Autor: Luciana Bonadio/G1.	12
Figura 3 - Pessoas esvaziando suas casas. Autor: Wilton Junior/ Agência Estado. .	13
Figura 4 - Mulher sendo resgatada. Autor: Wilton Junior/ Agência Estado.	14
Figura 5 - - Mapa de Localização do Município de Teresópolis (RJ), Brasil. Elaborado pela autora com base em dados do IBGE. (2025)	15
Figura 6 - NDVI do ano de 2000. Elaborado pela autora (2025)	25
Figura 7 - NDVI do ano de 2005. Elaborado pela autora (2025)	25
Figura 8 - NDVI do ano de 2010. Elaborado pela autora (2025).	26
Figura 9 - NDVI do ano de 2015. Elaborado pela autora (2025).	26
Figura 10 - NDVI do ano de 2020. Elaborado pela autora (2025)	27
Figura 11 - NDVI do ano de 2025. Elaborado pela autora (2025).	27
Figura 12 - NDBI do ano 2000. Elaborado pela autora (2025).	30
Figura 13 - NDBI do ano de 2005. Elaborado pela autora (2025).	30
Figura 14 - NDBI do ano de 2010. Elaborado pela autora (2025).	31
Figura 15 - NDBI do ano de 2015. Elaborado pela autora (2025).	31
Figura 16 - NDBI do ano de 2025. Elaborado pela autora (2025).	32
Figura 17 - NDBI do ano de 2020. Elaborado pela autora (2025).	32
Figura 18 - Mapa geomorfológico do município de Teresópolis – RJ, apresentando as principais unidades de relevo e suas formas associadas. Elaborado pela autora com base no acervo disponibilizado pelo CRPM (2025)	34
Figura 19 - Mapa geológico do município de Teresópolis – RJ, apresentando as principais unidades litológicas e estruturas. Elaborado pela autora (2025).....	37
Figura 20 - Mapa pedológico do município de Teresópolis – RJ, mostrando a distribuição das principais classes de solos da região. Elaborado pela autora (2025).	39
Figura 21- Mapa de declividade do município de Teresópolis – RJ, indicando as diferentes classes de inclinação do ambiente. Elaborado pela autora (2025).....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 2 - Dados e fontes utilizadas na pesquisa	17
Tabela 3 - Precipitação Pluviométrica Anual:	22
Tabela 4 - Classes e Interpretação Geomorfológica.	41

SILVEIRA, Maria Eduarda Guimarães. **Aplicação de Geotecnologias na Identificação e Análise da Vulnerabilidade Ambiental em Teresópolis (RJ)** Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Geografia Bacharelado. Universidade Federal de São João Del Rei, 2025.

RESUMO

A vulnerabilidade ambiental em áreas urbanas de relevo acidentado, como Teresópolis (RJ), resulta da combinação entre fatores naturais e processos antrópicos de urbanização desordenada. Este trabalho analisou a vulnerabilidade ambiental do município a partir da integração de índices espectrais e variáveis físico-geográficas, utilizando imagens orbitais de 2000 a 2025. Foram aplicados os índices NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e NDBI (Normalized Difference Built-up Index), combinados com dados geológicos, geomorfológicos e pedológicos, em ambiente de geoprocessamento e sensoriamento remoto. A análise multicritério permitiu gerar um mapa de vulnerabilidade ambiental, destacando áreas de maior suscetibilidade associadas à expansão urbana sobre terrenos instáveis. Os resultados demonstram a eficácia das geotecnologias para a identificação de áreas críticas e para o suporte ao planejamento urbano sustentável, reforçando a importância da integração entre diagnóstico físico-territorial e gestão ambiental preventiva em municípios inseridos em contextos de relevo complexo.

PALAVRAS-CHAVE: geoprocessamento; sensoriamento remoto; uso e cobertura da terra; suscetibilidade ambiental; planejamento territorial.

SILVEIRA, Maria Eduarda Guimarães. **Aplicação de Geotecnologias na Identificação e Análise da Vulnerabilidade Ambiental em Teresópolis (RJ)** Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Geografia Bacharelado. Universidade Federal de São João Del Rei, 2025.

ABSTRACT

Environmental vulnerability in urban areas with rugged relief, such as Teresópolis (Rio de Janeiro State), arises from the interaction between natural factors and unplanned urban expansion. This study analyzed the municipality's environmental vulnerability through the integration of spectral indices and physical-geographic variables using satellite imagery from 2000 to 2025. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Normalized Difference Built-up Index (NDBI) were processed and combined with geological, geomorphological, and pedological data within a remote sensing and GIS framework. A multicriteria analysis approach enabled the generation of an environmental vulnerability map, highlighting areas of high susceptibility linked to urban expansion over unstable terrains. The results demonstrate that geotechnologies are effective tools for identifying critical areas and supporting sustainable urban planning, emphasizing the relevance of integrating physical-territorial diagnosis with preventive environmental management in mountainous urban contexts.

Keywords: geotechnologies; remote sensing; land use and land cover; environmental susceptibility; territorial management.

1. INTRODUÇÃO

A dinâmica da urbanização desordenada em áreas de relevo acidentado tem se consolidado como um dos maiores e mais complexos desafios socioambientais no Brasil contemporâneo (Leite e Galvêncio, 2023). Essa problemática é particularmente acentuada em municípios serranos, como Teresópolis, no Rio de Janeiro, onde a alta suscetibilidade de regiões declivosas se encontra com a ocupação irregular (Dias, Hölbling e Grohmann, 2021).

O processo de deslizamento de encostas e a geração de áreas de risco são fenômenos socioambientais construídos, resultantes da interação entre a fragilidade do meio físico e a ocupação humana desplanejada (Pardal, Christofolletti e Martinez, 2024). A expansão urbana sobre áreas naturalmente vulneráveis — um processo estruturante no país — amplifica a degradação e empurra populações de baixa renda para zonas de perigo (Leite e Galvêncio, 2023), gerando, inclusive, impactos sanitários (Vissirini et al., 2023).

Nesse contexto, o regime pluviométrico atua como o principal agente deflagrador dos movimentos de massa. A análise dos dados de precipitação (2000-2025 para a área de estudo revela que o município está sujeito a um ciclo hidrológico intenso, com uma média anual de 1608.2 mm e uma concentração de chuvas no verão, sendo Dezembro o mês mais chuvoso em média (303.8 mm). Tais volumes reforçam a necessidade de cautela, especialmente em períodos críticos, como o registrado em Janeiro de 2007, que alcançou o pico mensal da série histórica (517.8 mm).

O município de Teresópolis apresenta um histórico recorrente de escorregamentos (Amaral, 2016) devido à combinação de fatores naturais: encostas íngremes, solos rasos e litologias frágeis. O mapeamento geomorfológico indica que mais de 80% da bacia do rio das Bengalas é composta por setores de média e alta encosta (Rosa Guimarães et al., 2023). Morfoestruturalmente, Teresópolis insere-se em um sistema de alta energia e instabilidade intrínseca (Aires et al., 2012).

Essa suscetibilidade natural é drasticamente amplificada pela supressão de vegetação e pela urbanização acelerada sobre áreas declivosas (Dias, Hölbling e Grohmann, 2021). Essa vulnerabilidade se materializou na tragédia de janeiro de 2011, classificada como a maior catástrofe climática e geotécnica do país (Busch e Amorim, 2011). Em Teresópolis, o evento contabilizou 392 mortes e deixou quase

16.000 pessoas desalojadas ou desabrigadas (Rosi et al., 2019). A ocupação histórica de encostas e margens de rios — marcada por desmatamento, expansão informal e fragilidade institucional — foi o agravante central que expôs um quadro clássico de risco socioambiental construído (Busch e Amorim, 2011).



Figura 1 - Deslizamentos Autor: Marino Azevedo/Governo do Estado do Rio de Janeiro.



Figura 2 - Deslizamento de Rochas Autor: Luciana Bonadio/G1.

Diante da complexidade desse cenário, o emprego de geotecnologias — sensoriamento remoto e geoprocessamento — é essencial para o monitoramento e a prevenção. A utilização de índices espectrais como NDVI e NDBI permite quantificar a conversão de áreas vegetadas em superfícies impermeáveis, oferecendo uma base sólida para a avaliação dos impactos ambientais da urbanização (Mohiuddin, Mund e Rahaman, 2023).

Dessa forma, a hipótese central desta pesquisa é que a expansão urbana e o adensamento populacional sobre áreas naturalmente frágeis ampliam significativamente a vulnerabilidade ambiental de Teresópolis, intensificando os riscos de deslizamentos, erosão, enchentes e danos socioeconômicos. A integração de variáveis geológicas, geomorfológicas, pedológicas e espectrais possibilita uma análise multiescalar e robusta que pode subsidiar a formulação de políticas públicas mais eficazes de ordenamento territorial e prevenção de desastres.



Figura 3 - Pessoas esvaziando suas casas. Autor: Wilton Junior/ Agência Estado.



Figura 4 - Mulher sendo resgatada. Autor: Wilton Junior/ Agência Estado.

2. ÁREA DE ESTUDO

O município de Teresópolis está localizado na Região Serrana do estado do Rio de Janeiro, integrando a microrregião de Três Rios, conforme divisão regional do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019). A sede municipal situa-se a aproximadamente 91 km da capital fluminense, com acesso principal pela Rodovia BR-116 (Rio–Bahia). O município limita-se ao norte com São José do Vale do Rio Preto, ao sul com Guapimirim, a Leste com Cachoeiras de Macacu e a oeste com Petrópolis. Teresópolis possui área territorial de 773,0 km² e população estimada em 184.240 habitantes (IBGE, 2022), distribuída entre zona urbana e rural.

Do ponto de vista ambiental, cerca de 35% do território municipal está inserido em unidades de conservação, entre as quais se destaca o Parque Nacional da Serra dos Órgãos, que abrange os setores mais elevados e preserva remanescentes significativos de Mata Atlântica (INPE, 2020). Essa área é essencial para a manutenção dos mananciais e da biodiversidade local, exercendo papel importante na regulação climática regional.

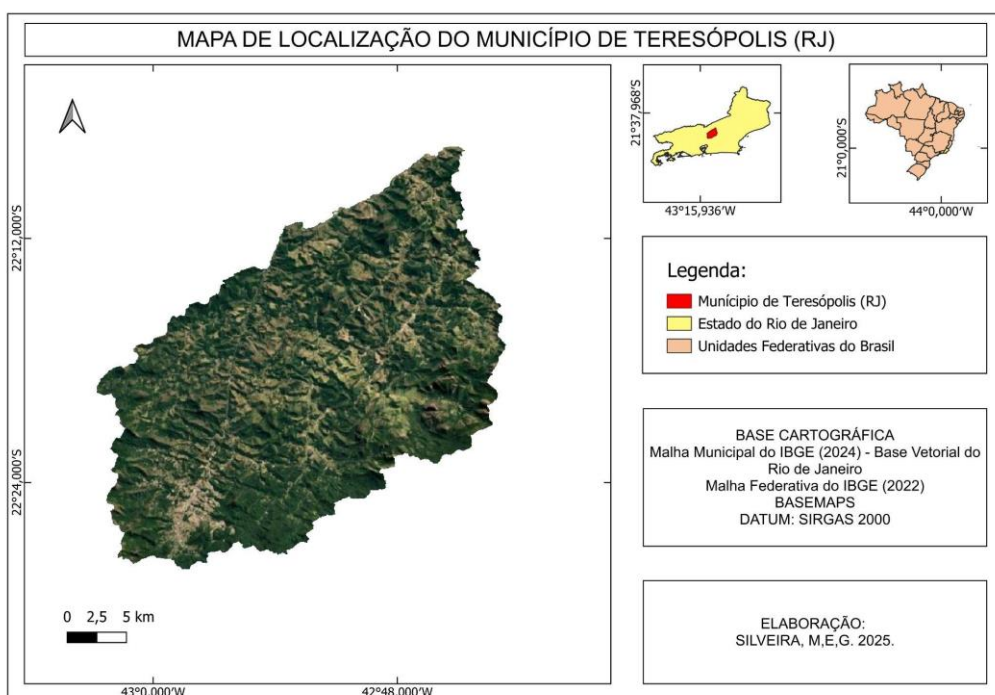


Figura 5 - - Mapa de Localização do Município de Teresópolis (RJ), Brasil. Elaborado pela autora com base em dados do IBGE. (2025)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Base de Dados Utilizada

3.1.1 Índices Pluviométricos (INMET)

Os dados de precipitação foram obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) por meio do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP). A série histórica corresponde aos anos 2000 e 2025, coincidindo com os períodos analisados nas imagens orbitais. A base pluviométrica incluiu:

- precipitação mensal (mm);
- totais anuais;
- identificação de anos de anomalia positiva e negativa;
- cálculo de médias móveis para compreensão de tendências.

Essa etapa permitiu relacionar a dinâmica climática com os processos de expansão urbana, cobertura vegetal e possíveis alterações nos indicadores ambientais.

3.1.2 Aquisição dos dados orbitais

O estudo foi realizado com base em uma série temporal de imagens orbitais, abrangendo o período de 2000 a 2025, com o objetivo de identificar padrões de vulnerabilidade ambiental relacionados à expansão urbana no município de Teresópolis (RJ).

Foram utilizadas imagens provenientes dos satélites Landsat 5 Thematic Mapper (TM), Resourcesat-2 Linear Imaging Self-Scanning Sensor 3 (LISS-III) e Landsat 8 Operational Land Imager (OLI).

As imagens foram adquiridas junto ao United States Geological Survey (USGS), por meio do portal *Earth Explorer*, e ao National Remote Sensing Centre (NRSC/ISTO), no caso do Resourcesat-2.

O Landsat 5 TM, operante entre 1985 e 2013, dispõe de sete bandas espectrais, com resolução espacial de 30 metros nas bandas refletivas e 120 metros na banda termal (USGS, 2017).

Já o Landsat 8 OLI/TIRS, operante desde 2013, possui 11 bandas espectrais, sendo 30 metros para as bandas multiespectrais, 15 metros para a banda pancromática e 100 metros para as bandas termais (USGS, 2017).

As imagens utilizadas neste estudo incluem produtos Landsat Collection 2 Level-2, que já possuem correção atmosférica incorporada (Surface Reflectance), permitindo sua aplicação direta nas análises.

Essas imagens foram selecionadas considerando períodos de mínima cobertura de nuvens, priorizando datas equivalentes entre as séries temporais para permitir a análise multitemporal.

3.1.2 Dados complementares e base cartográfica

A base cartográfica utilizada foi composta por produtos vetoriais e raster de instituições oficiais, garantindo precisão espacial e consistência entre as variáveis analisadas.

Foram empregados:

- Modelo Digital de Elevação (MDE/SRTM, 30 m) – obtido da Copernicus DEM, utilizado para derivar mapas de declividade e hipsometria;

- Mapa geológico – obtido da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2016), em escala 1:400.000, permitindo a identificação das unidades litológicas;
- Mapa geomorfológico – obtido da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM,2017), em escala 1:70.000, permitindo identificação das formas de relevo.
- Mapa pedológico – obtido do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023), em escala 1: 250.000, para caracterização dos tipos de solo;
- Malha municipal e rede hidrográfica – também provenientes do IBGE, utilizadas para recorte e contextualização espacial da área de estudo.

Tabela 1 - Dados e fontes utilizadas na pesquisa

Tipo de dado	Fonte	Resolução / Escala	Período	Aplicação
Imagens Landsat 5 TM	USGS – Earth Explorer	30 m	1985–2011	NDVI e NDBI
Imagens Landsat 8 OLI/TIRS	USGS – Earth Explorer	30 m	2013–2025	NDVI e NDBI
Modelo Digital de Elevação (SRTM)	Copernicus DEM	30 m	—	Declividade e relevo
Mapa geológico	CPRM (2016)	1: 400.000	—	Identificação litológica
Mapa pedológico	IBGE (2023)	1:250.000	—	Tipos de solo
Mapa geomorfológico	CPRM (2017)	1: 70.000	—	Formas do relevo

3.2 Métodos

3.2.1 Pré-processamento e cálculo dos índices espectrais

As imagens Landsat utilizadas neste estudo incluem produtos Landsat Collection 2 Level-2, que já possuem correção atmosférica incorporada (Surface Reflectance), permitindo sua aplicação direta nas análises. Adotados, recorte da área de estudo e reprojeção para o sistema de coordenadas UTM/SIRGAS 2000, Zona 23S. Esses procedimentos foram realizados nos softwares QGIS 3, conforme as orientações técnicas do USGS (2017).

A etapa seguinte consistiu no cálculo dos índices espectrais NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e NDBI (Normalized Difference Built-up Index), com base nas equações propostas por Rouse et al. (1974) e Zha, Gao e NI (2010):

Equação 1 - NDVI – (Normalized Difference Vegetation Index)

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

Equação 2 - NDBI - (Normalized Difference Built-Up Index)

$$NDBI = \frac{(SWIR - NIR)}{(SWIR + NIR)}$$

O NDVI foi empregado para identificar a densidade e o vigor da vegetação, enquanto o NDBI indicou o grau de urbanização e a substituição de áreas naturais por superfícies impermeáveis.

Esses índices têm sido amplamente utilizados em estudos de expansão urbana e vulnerabilidade ambiental (Guha et al., 2018; Mohiuddin e Mund 2023).

3.2.2 Análises geológicas, geomorfológicas e pedológicas

As variáveis geológicas, geomorfológicas e pedológicas foram processadas e integradas para representar os condicionantes físico-naturais da vulnerabilidade ambiental. A declividade foi derivada a partir do MDE SRTM, classificada conforme Ross (2011): 0–8% (baixa), 8–20% (moderada) e 20% (alta).

As unidades litológicas foram classificadas de acordo com sua resistência ao intemperismo e fraturamento (CPRM, 2016), enquanto os solos foram categorizados conforme a profundidade e estabilidade do perfil (IBGE, 2022).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta e analisa os resultados obtidos a partir da integração dos índices espectrais NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e NDBI (Normalized Difference Built-up Index), calculados para o município de Teresópolis (RJ) no período de 2000 a 2025. A análise multitemporal desses índices permitiu identificar as transformações ocorridas no uso do solo e na cobertura vegetal, destacando a relação entre o avanço da urbanização e a redução das áreas vegetadas em setores de elevada fragilidade geomorfológica.

Além dos índices espectrais, os resultados desta pesquisa incorporam uma análise pluviométrica de longo prazo, uma vez que o regime de chuvas desempenha papel determinante na dinâmica ambiental de Teresópolis. Trata-se de um município caracterizado por volumes elevados de precipitação e forte suscetibilidade a movimentos de massa. Conforme apontam Coelho Netto (2005), Augusto Filho e Guerra (2012), e Ramos et al. (2017), a combinação entre encostas íngremes, solos rasos, litologias fraturadas e chuvas concentradas constitui o principal conjunto de fatores responsáveis pela recorrência de deslizamentos na Região Serrana. Dias et al. (2019) reforçam que eventos extremos de precipitação atuam como gatilhos diretos para a mobilização de encostas, amplificando a vulnerabilidade socioambiental em áreas urbanizadas. Dessa forma, a incorporação da variabilidade pluviométrica contribui para interpretar de maneira mais robusta os padrões detectados nos índices NDVI e NDBI, inserindo-os em um contexto climático que influencia diretamente a degradação ambiental, a saturação dos solos e a dinâmica erosiva.

O NDVI foi empregado como indicador da densidade e vigor da vegetação, permitindo avaliar a evolução da cobertura vegetal ao longo do tempo. Valores elevados representam áreas com vegetação densa e saudável, enquanto valores reduzidos (próximos de zero ou negativos) sinalizam superfícies impermeáveis, solo exposto ou ausência de vegetação (Huete et al., 2002; Guha et al., 2018). Por outro lado, o NDBI foi utilizado para identificar a expansão das áreas urbanizadas, uma vez que valores positivos estão associados à presença de construções e superfícies típicas de ambientes urbanos (Zha; Gao; Ni, 2003).

A sobreposição dos resultados de NDVI e NDBI, associada às informações geológicas, geomorfológicas e pedológicas, possibilitou compreender a expansão urbana e seus efeitos sobre a vulnerabilidade ambiental de Teresópolis. Essa integração evidenciou que o crescimento urbano avançou em direção a encostas íngremes, vales encaixados e áreas de instabilidade natural, condizendo com o padrão observado em diversos municípios brasileiros, onde o uso inadequado do solo intensifica riscos e pressiona ecossistemas frágeis (Mohiuddin; Mund, 2024; Moroz; Thieken, 2024).

Os mapas temáticos elaborados para cada período (2000, 2005, 2010, 2015, 2020 e 2025) permitiram visualizar a evolução espacial da cobertura vegetal (NDVI) e da densificação urbana (NDBI), destacando os contrastes entre os setores preservados e aqueles sob intensa pressão antrópica. Essa análise cartográfica oferece uma base empírica para a discussão da degradação ambiental, da ausência de planejamento territorial e da ampliação da vulnerabilidade socioambiental no município.

A análise ambiental também foi aprofundada com base nos mapas geológico, geomorfológico e pedológico, que possibilitaram compreender a relação entre os processos naturais e as transformações antrópicas no território. O mapa geológico (CPRM, 2014) permitiu identificar formações litológicas e zonas de fraturamento associadas à instabilidade do relevo. O mapa geomorfológico (DRM-RJ, 2015) evidenciou áreas de maior declividade e dissecação, destacando setores propensos à erosão e movimentos de massa. Já o mapa pedológico (IBGE, 2023) revelou a predominância de solos rasos e altamente erodíveis nas vertentes íngremes, condição que potencializa a vulnerabilidade quando combinada à supressão da vegetação e à impermeabilização urbana. A integração desses componentes permitiu associar a expansão urbana observada pelos índices espectrais às condições físicas do meio, alinhando-se às discussões de Gonçalves et al. (2022) e Moroz e Thieken (2024) sobre a interação entre fatores naturais e antrópicos na configuração da vulnerabilidade socioambiental urbana.

4.1 Análise Pluviométrica (2000–2024)

A análise pluviométrica do município de Teresópolis para o período de 2000 a 2024 revela um comportamento marcado por volumes elevados de precipitação anual e forte variabilidade intra e interanual. Esses padrões estão diretamente associados à

dinâmica climática regional, influenciada pela elevação do relevo, pela atuação de sistemas frontais, pela umidade advinda do Atlântico e pelos mecanismos de convergência orográfica, que intensificam a ocorrência de chuvas de alta intensidade. Estudos clássicos e recentes sobre a Região Serrana indicam que esses fatores contribuem para a expressão dos maiores índices pluviométricos do estado do Rio de Janeiro (Coelho Netto, 2005; Ramos et al., 2017; Dias et al., 2019).

Os dados anuais demonstram que o município apresenta acumulados mensais frequentemente superiores aos observados em outras regiões do estado, com destaque para os meses de verão, período em que se concentram os eventos de maior intensidade. Essa distribuição sazonal está alinhada ao comportamento típico de áreas serranas tropicais, onde episódios convectivos combinados à ascensão orográfica produzem volumes expressivos de precipitação (Coelho Netto, 2005).

A série histórica evidencia anos com totais substancialmente elevados, sobretudo quando associados a eventos extremos, responsáveis por ativar processos de instabilidade nas encostas. Esses episódios encontram suporte na literatura, que reconhece a precipitação intensa como o principal gatilho de movimentos de massa em encostas íngremes e com solos de baixa profundidade — características marcantes de Teresópolis (Augusto Filho; Guerra, 2012; Ramos et al., 2017).

Na análise integrada com os índices NDVI e NDBI, verificou-se que a variabilidade pluviométrica exerce influência direta na dinâmica ambiental do município. Em anos de precipitação elevada, há tendência de redução da cobertura vegetal em áreas já fragilizadas por pressão antrópica, como zonas urbanizadas ou em processo de expansão. Essa interação reforça a importância de considerar o regime de chuvas não apenas como um elemento climático, mas como um fator estruturante na compreensão da vulnerabilidade socioambiental do território. Conforme apontam Dias et al. (2019), a recorrência de extremos pluviométricos em regiões serranas, somada à urbanização desordenada, intensifica riscos, eleva a exposição populacional e agrava processos erosivos.

Por fim, a análise de 2000 a 2024 confirma que Teresópolis apresenta um dos regimes pluviométricos mais expressivos do estado como apresenta a Tabela X, com picos sazonais que, combinados às características geológicas e geomorfológicas locais, tornam o município intrinsecamente suscetível a deslizamentos. Esses resultados reforçam a necessidade de políticas públicas de

ocupação que integrem clima, relevo, uso do solo e expansão urbana, conforme defendem Santos e Cortese (2022) e Gonçalves et al. (2022).

Tabela 2 - Precipitação Pluviométrica Anual:

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
2000	null	114.6	160.4	87.3	40.3	2	94.1	114.6	113.6	86.8	198.1	227.4	1239.2
2001	269.8	216.9	184	190.3	73.3	2.3	18.9	7.7	73.4	91.5	151.6	422.2	1701.9
2002	316	202	148	116	77	6	35	24	124	54	282	508	1892
2003	323	49	193	52	55	35	31	66	43	177	351	164	1539
2004	227	340	154	106	70	38	118	10	13	122	238	311	1747
2005	413	279	243	94	57	78	72	3	51	52	226	327	1895
2006	134.9	125.8	209	102.9	40.3	22.3	28.7	25.6	68.1	116.4	278.2	300.2	1452.4
2007	517.8	123.3	118.7	97.2	50.6	23.2	27.5	0.1	30.2	90.8	259.9	215.5	1555.0
2008	286.6	347.2	367.6	128.7	37	16.5	4.8	52.2	57.2	104	255.9	301.3	1958.0
2009	303.8	148.9	123.6	59.7	54.2	44.2	74.3	13.2	82.2	216.1	392.9	352.9	1866.0
2010	221.5	186.8	346.7	null	71.7	43	30.1	5.1	36.2	166.3	230.9	446.6	1784.9
2011	348.3	67.3	323.9	null	32.6	39.2	13.6	29.2	19.2	163.4	172.4	368.7	1577.8
2012	360.3	135.3	172	257.9	98.7	44.3	34.5	52.6	95	39.6	220.3	133	1644.5
2013	363.5	187.3	331.7	78.2	74.2	75.1	98.7	22.4	null	116.7	203.7	215.5	1767.0
2014	157.4	35.1	214.2	181.4	47.8	49.6	49	34.7	null	91.4	235	101.7	1197.3
2015	102.7	130.5	226.3	100.7	null	61.7	12.9	17.4	88.5	53.3	170	170.7	1134.7
2016	437.8	294.6	177.9	null	38.8	86.3	0.3	36	64.9	113.1	372.4	356.5	1978.6
2017	183.5	149.3	258.7	127.2	80.6	72.8	59.9	43	5.3	null	154.5	161.6	1296.4
2018	316.1	156.1	281.1	74.2	98.6	7.7	23.6	86.3	null	106	166.7	176.9	1493.3
2019	183.7	186.8	204.5	90.4	127.4	26.6	14	37.1	87.9	79.6	129.2	256.2	1423.4
2020	248.6	376.5	null	21.5	55.6	8.1	11.3	59.6	64.8	null	null	312.7	1158.7
2021	220.5	219.5	117.5	81.8	28.9	25	0	44.2	40	182.1	134.7	null	1094.2
2022	286.2	303.2	124.9	140.9	14.3	null	26.3	78.5	75.7	44.9	219.2	316.4	1630.5
2023	382.6	216.6	99.1	135.6	29.8	14.8	53.5	61.1	44.2	146.2	211.8	85.5	1480.8
2024	292.2	211.1	369.4	8.7	21.8	6.5	32.1	52.4	19.9	112.6	219.1	279.1	1625.0

4.2 Evolução da cobertura vegetal (NDVI) – 2000 a 2025

A análise multitemporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) entre os anos de 2000 e 2025 revelou um processo progressivo de redução da cobertura vegetal no município de Teresópolis (RJ), especialmente nas áreas mais próximas ao núcleo urbano e ao longo dos principais eixos viários. Essa tendência expressa de forma espacial o avanço da urbanização sobre áreas naturais, reforçando a relação entre o crescimento urbano desordenado e a vulnerabilidade ambiental (GONÇALVES et al., 2022; MOROZ; THIEKEN, 2024).

O período compreendido entre 2000 e 2005 evidencia uma acentuação dessa tendência. As classes com NDVI inferior a 0,20 passam a ocupar maior extensão, notadamente nas bordas do perímetro urbano e ao longo de drenagens secundárias. As classes superiores a 0,41 restringem-se às áreas de altitude elevada, como o Parque Nacional da Serra dos Órgãos e setores da Serra do Capim-Amarelo. Segundo

Gonçalves et al. (2022), essa configuração reflete um padrão típico das cidades serranas brasileiras, em que a vegetação remanescente é preservada apenas nas áreas de difícil acesso e menor pressão urbana.

Entre 2010 e 2015, os valores de NDVI revelam a intensificação da fragmentação florestal. A substituição de cobertura vegetal por áreas construídas e solo exposto é acompanhada de uma reorganização espacial do uso do solo, resultando em manchas descontínuas de vegetação com forte efeito de borda. Marandola Jr. (2014) discute que essa descontinuidade espacial está diretamente associada ao aumento da vulnerabilidade socioambiental, uma vez que reduz a capacidade de resiliência ecológica e aumenta a exposição da população a desastres induzidos por processos geomorfológicos.

Por fim, os mapas referentes a 2020 e 2025 evidenciam uma nova fase da dinâmica urbana de Teresópolis, marcada por adensamento e expansão periférica. As classes de NDVI inferiores a 0,15 tornam-se dominantes nas regiões centrais e médias encostas, enquanto as áreas com índices superiores a 0,40 restringem-se a porções isoladas do norte e nordeste do município. A recuperação pontual da vegetação observada em 2025, em áreas de altitude e zonas de proteção ambiental, reflete a implementação de medidas de conservação e reflorestamento, embora ainda insuficientes para reverter a tendência geral de degradação.

Esses resultados confirmam o processo de substituição gradual da vegetação por áreas urbanizadas ao longo de quatro décadas, evidenciando a forte relação entre a ocupação antrópica e a perda de cobertura vegetal. Conforme Turner et al. (2003), a vulnerabilidade territorial decorre justamente dessa interação entre pressões humanas e sistemas ambientais frágeis. Em Teresópolis, essa relação se expressa de forma clara: a ocupação de encostas instáveis e a impermeabilização do solo reduziram a capacidade de regulação hidrológica e aumentaram a suscetibilidade a deslizamentos e enchentes.

A análise do NDVI, portanto, permite compreender a trajetória da transformação do espaço geográfico de Teresópolis. Entre 1985 e 2025, a cidade consolidou um padrão de urbanização que intensifica desigualdades territoriais e amplia a exposição a riscos naturais, em consonância com os achados de Moroz e Thieken (2024), que demonstram como o crescimento urbano e a segregação espacial são vetores diretos do aumento do risco de desastres.

Essas evidências reforçam a necessidade de integrar as análises espectrais com informações geológicas, geomorfológicas e pedológicas, de modo a compreender as limitações físicas do território e subsidiar o planejamento urbano. Como afirmam Cutter (2003) e Marandola Jr. (2014), a vulnerabilidade ambiental não deve ser interpretada apenas como condição natural, mas como produto de escolhas espaciais e políticas.

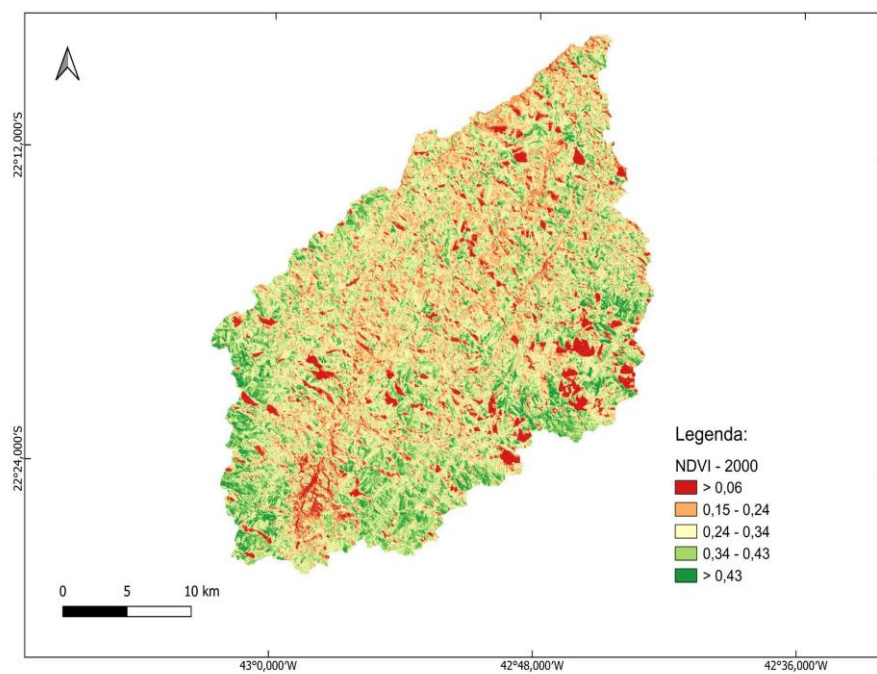


Figura 6 - NDVI do ano de 2000. Elaborado pela autora (2025)

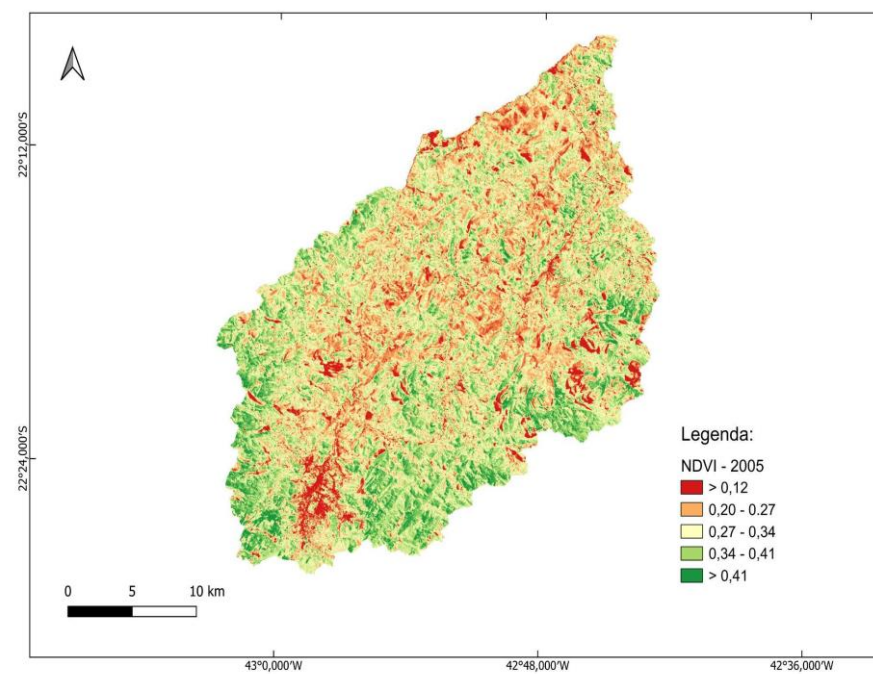


Figura 7 - NDVI do ano de 2005. Elaborado pela autora (2025)

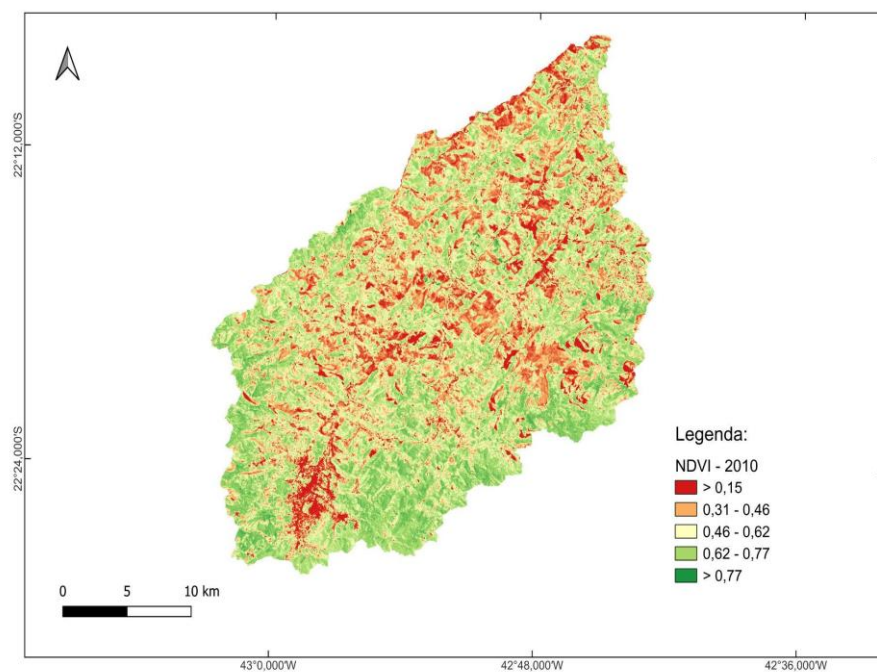


Figura 8 - NDVI do ano de 2010. Elaborado pela autora (2025).

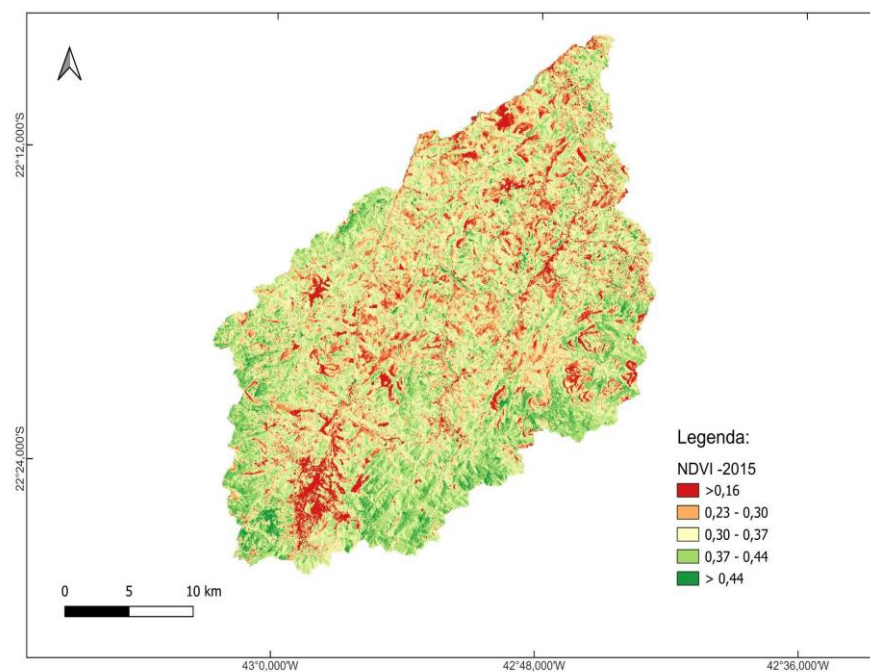


Figura 9 - NDVI do ano de 2015. Elaborado pela autora (2025).

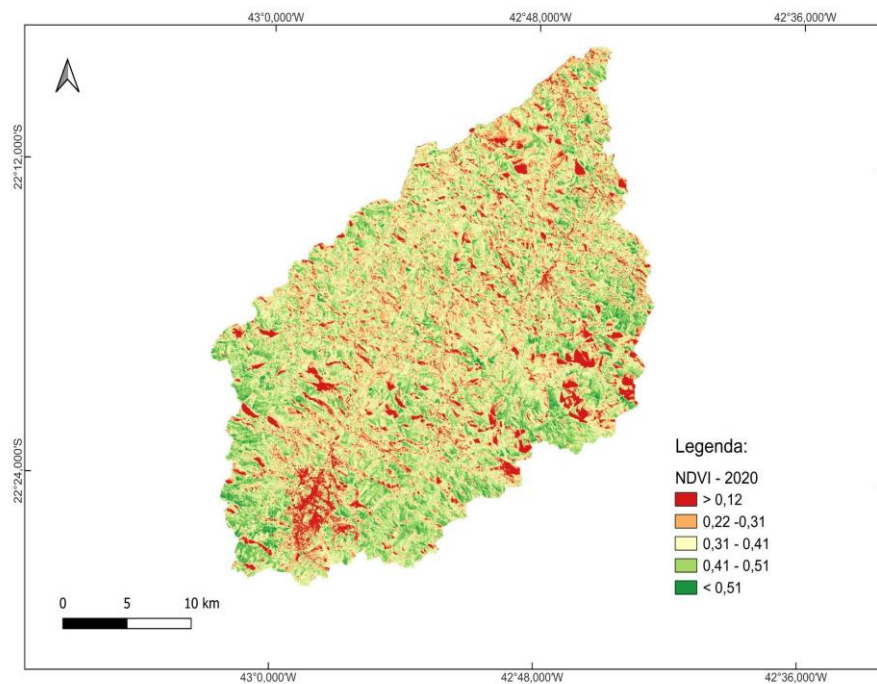


Figura 10 - NDVI do ano de 2020. Elaborado pela autora (2025)

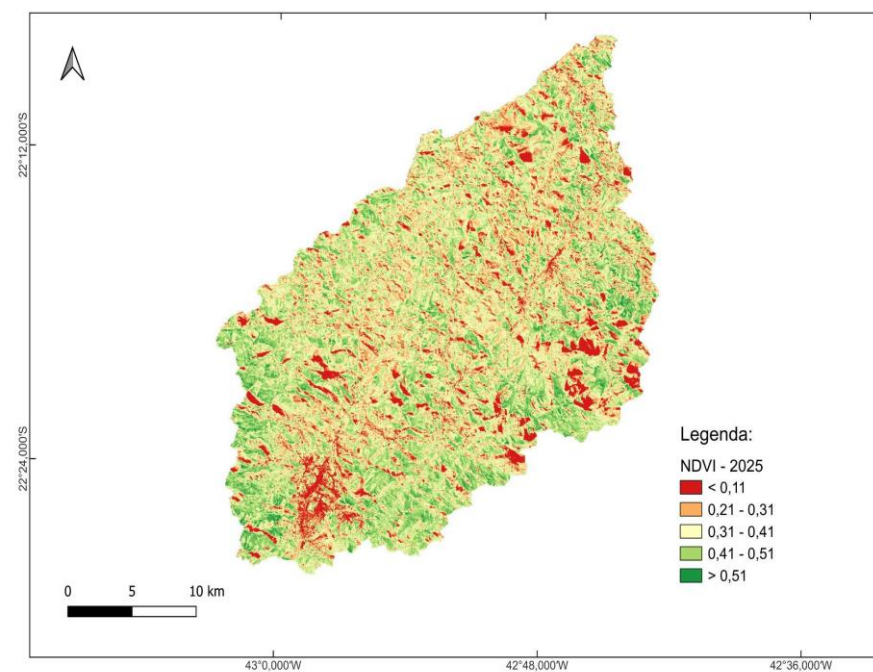


Figura 11 - NDVI do ano de 2025. Elaborado pela autora (2025).

4.3 Evolução da expansão urbana (NDBI) – 2000 a 2025

A análise temporal do Índice de Diferença Normalizada de Áreas Construídas (NDBI) entre 2000 e 2025 permitiu identificar o padrão de crescimento urbano e a substituição progressiva de áreas vegetadas por superfícies antrópicas no município de Teresópolis (RJ). Os valores positivos de NDBI indicam regiões com maior presença de superfícies impermeáveis — como telhados, vias pavimentadas e construções —, enquanto valores negativos ou próximos de zero estão associados a áreas com cobertura vegetal densa ou solos expostos (ZHA; GAO; NI, 2003; GARCÍA; PÉREZ, 2016).

No início dos anos 2000, o NDBI evidencia um salto significativo nas zonas urbanizadas, com a emergência de manchas contínuas de valores acima de 0,25. Essa tendência está alinhada com os resultados observados por Mohiuddin, Mund (2024), que destacam a relação direta entre o aumento do NDBI e a substituição da cobertura vegetal pelo tecido urbano. Em Teresópolis, essa transição espacial se manifesta na consolidação de bairros periféricos e no avanço da ocupação sobre áreas declivosas, especialmente nas porções sudoeste e nordeste do município.

O período entre 2005 e 2010 é marcado por um aumento expressivo dos valores médios de NDBI, acompanhado de redução simultânea dos índices de NDVI — um padrão que, conforme Gonçalves et al. (2022), indica a intensificação da impermeabilização do solo. Essa fase coincide com o crescimento populacional acelerado e a expansão de áreas residenciais em regiões inadequadas do ponto de vista geotécnico, conforme denunciado no relatório da Assembleia Legislativa do Estado do Rio de Janeiro (ALERJ, 2011) e nos dados da Controladoria-Geral da União (CGU, 2011) sobre os impactos do desastre de 2011.

Entre 2010 e 2015, os mapas de NDBI mostram a consolidação da malha urbana e o surgimento de novos núcleos habitacionais, com valores superiores a 0,25 distribuídos de maneira mais difusa. Essa expansão horizontal reflete a ausência de controle sobre o uso e ocupação do solo, intensificando a sobreposição de áreas construídas a zonas de fragilidade geomorfológica e pedológica. Cutter (2003) e Turner et al. (2003) ressaltam que a vulnerabilidade ambiental decorre justamente desse descompasso entre a ocupação territorial e a capacidade de suporte físico do

ambiente — uma realidade visível em Teresópolis, onde o processo de urbanização ocorreu sem respaldo em diagnósticos técnicos de risco.

O ano de 2020 revela uma nova configuração: o adensamento urbano em áreas já ocupadas e a expansão para regiões de borda, sobretudo nas comunidades de Fonte Santa, Rosário e Beira Linha. Os valores de NDBI superiores a 0,03 tornam-se predominantes nessas áreas, sinalizando forte impermeabilização e perda quase total da cobertura vegetal. Por outro lado, pequenas manchas de NDBI negativo persistem nas regiões de altitude e nas áreas protegidas do Parque Nacional da Serra dos Órgãos, sugerindo que a vegetação remanescente resiste principalmente nas zonas de maior declividade e restrição construtiva.

Ao longo das quatro décadas analisadas, o NDBI revela uma trajetória contínua de urbanização não planejada e espacialmente desigual. Essa expansão, associada à topografia acidentada e à fragilidade geológica local, reforça a tese de que a vulnerabilidade ambiental de Teresópolis é uma consequência direta da ocupação inadequada do território. Marandola Jr. (2014) argumenta que o risco não é apenas físico, mas socialmente produzido — e os dados obtidos neste estudo demonstram isso: quanto maior a densidade construída e menor a vegetação, maior a exposição das populações a eventos naturais extremos.

Os resultados obtidos a partir do NDBI, quando integrados aos dados de NDVI e às análises geológicas, geomorfológicas e pedológicas, evidenciam a sobreposição entre áreas urbanizadas e zonas de fragilidade natural. Essa constatação reforça a importância de uma abordagem integrada de planejamento territorial, conforme defendem Gonçalves et al. (2022) e Moroz & Thieken (2024), em que o sensoriamento remoto e a modelagem espacial sejam ferramentas de apoio à formulação de políticas públicas voltadas à mitigação de riscos e à sustentabilidade urbana.

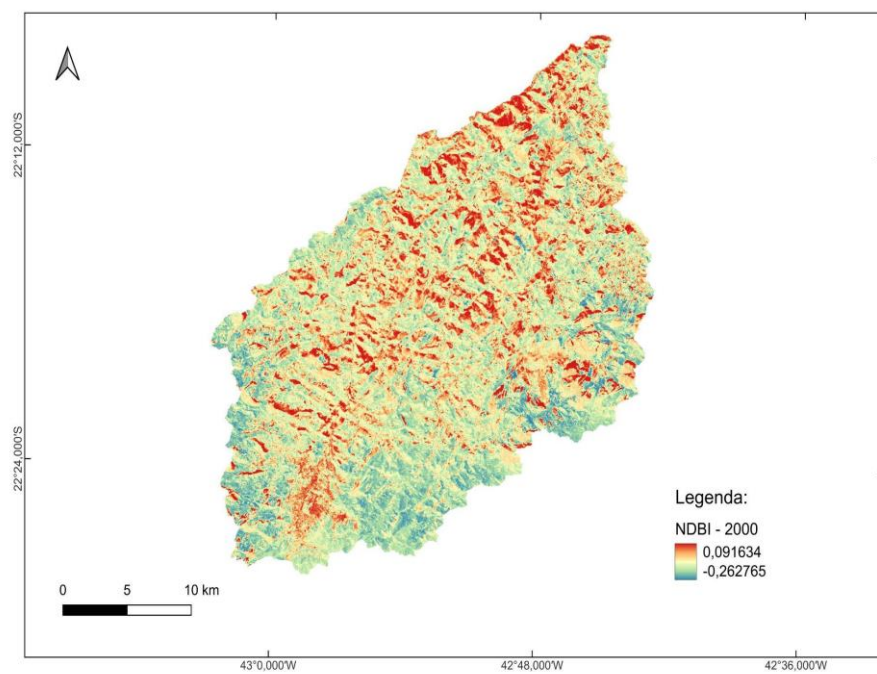


Figura 12 - NDBI do ano 2000. Elaborado pela autora (2025).

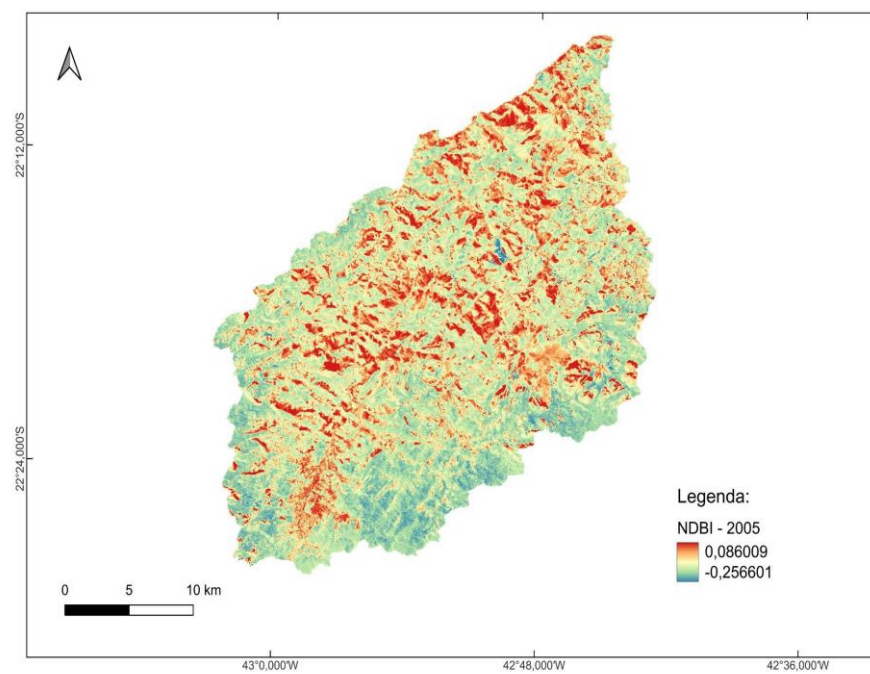


Figura 13 - NDBI do ano de 2005. Elaborado pela autora (2025).

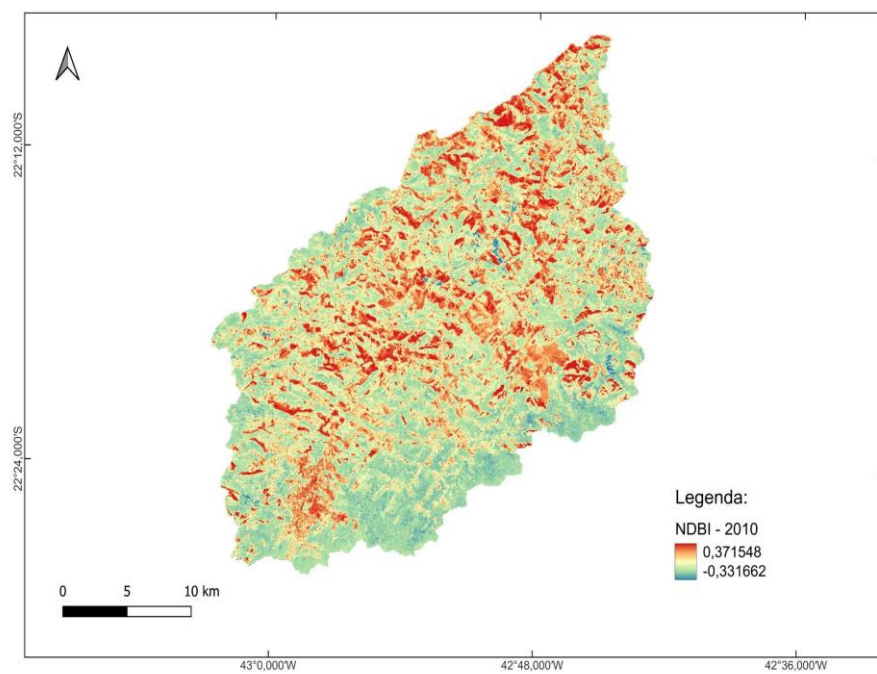


Figura 14 - NDBI do ano de 2010. Elaborado pela autora (2025).

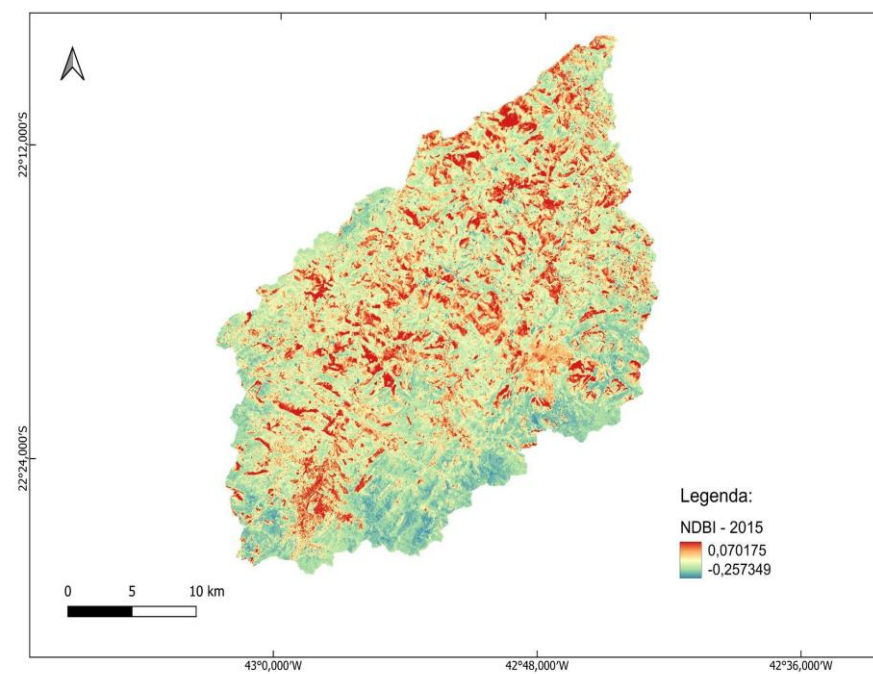


Figura 15 - NDBI do ano de 2015. Elaborado pela autora (2025).

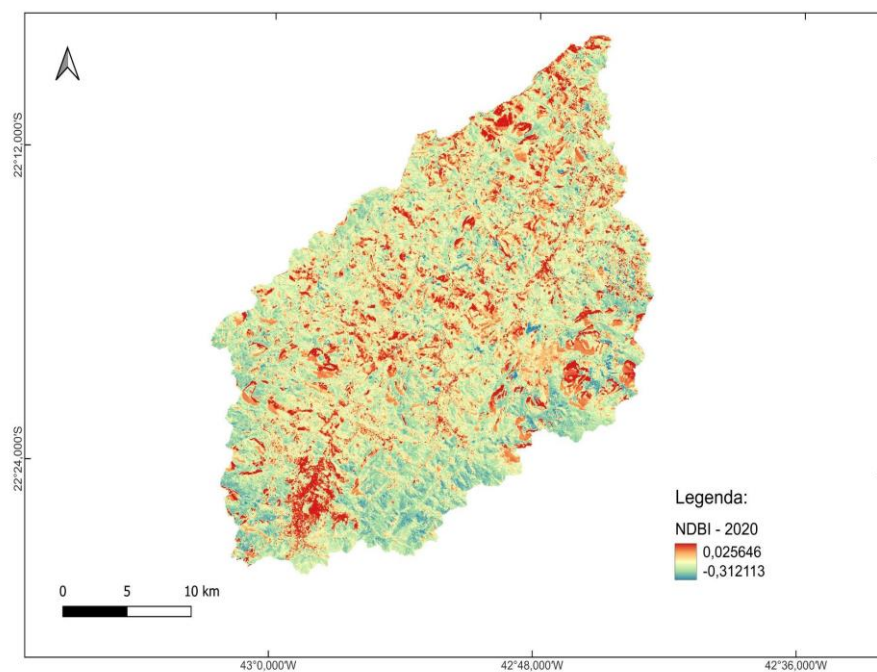


Figura 17 - NDBI do ano de 2020. Elaborado pela autora (2025).

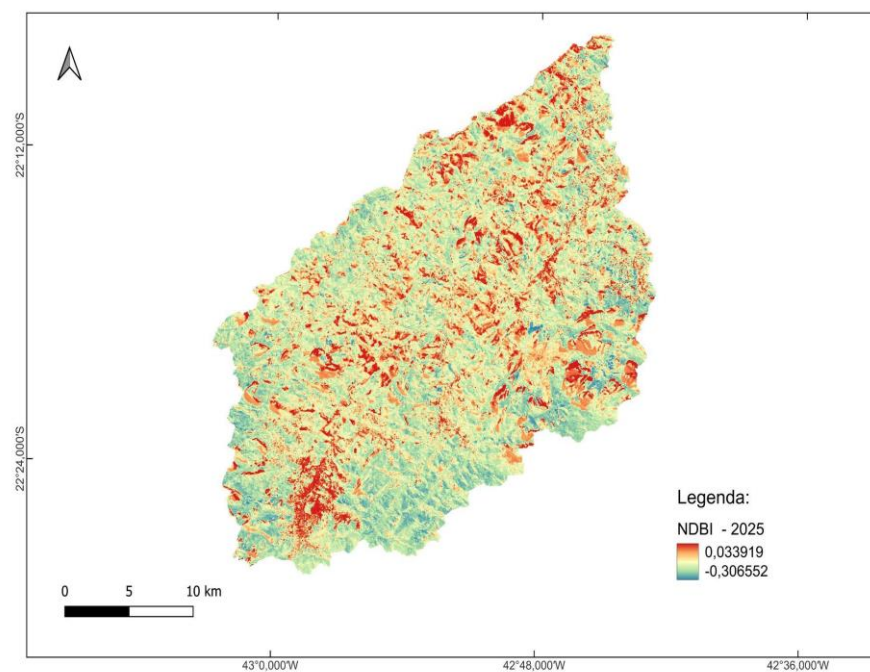


Figura 16 - NDBI do ano de 2025. Elaborado pela autora (2025).

4.4 Análise Geomorfológica, Geológica e Pedológica Integrada

A análise integrada dos aspectos geomorfológicos, geológicos, pedológicos e hipsométricos de Teresópolis possibilita compreender os fatores naturais que condicionam sua vulnerabilidade ambiental. Esses elementos físicos, quando associados à expansão urbana e à ocupação irregular, exercem papel determinante na intensificação de processos erosivos e de movimentos de massa. Conforme Turner et al. (2003) e Cutter (2003), a vulnerabilidade ambiental decorre da interação entre características físicas do território e fatores sociais e econômicos que modulam o risco. Assim, compreender a base física do município é essencial para a interpretação dos padrões de fragilidade ambiental observados ao longo do período analisado.

4.3.1 Análise Geomorfológica

O Mapa Geomorfológico de Teresópolis (Figura 21) evidencia um relevo marcado por forte dissecação e alto gradiente altimétrico, típico das formações associadas à Serra do Mar. As morfologias predominantes são morrarias altas e médias, intercaladas por platôs estruturais e planícies fluviais. Aires et al. (2012) destacam que o relevo serrano fluminense foi moldado por processos tectônicos cenozoicos e erosão diferencial, resultando em escarpas íngremes e vales encaixados.

Nas porções central e leste do município, onde o relevo é mais acidentado, observa-se a coincidência entre áreas urbanizadas e encostas de alta declividade. Gonçalves et al. (2022) identificam que o avanço urbano sobre rampas coluviais e setores de vertente instável constitui um dos principais fatores de ampliação da vulnerabilidade geomorfológica nas cidades de relevo montanhoso do Sudeste. Nessas condições, a impermeabilização do solo e a supressão da cobertura vegetal reduzem a infiltração e intensificam o escoamento superficial, ampliando o risco de erosão e movimentos de massa, conforme discutido por Moroz e Thieken (2024).

O padrão geomorfológico de Teresópolis, portanto, caracteriza-se por alta fragilidade natural, exigindo rigor no controle da ocupação em encostas e áreas suscetíveis à instabilidade.

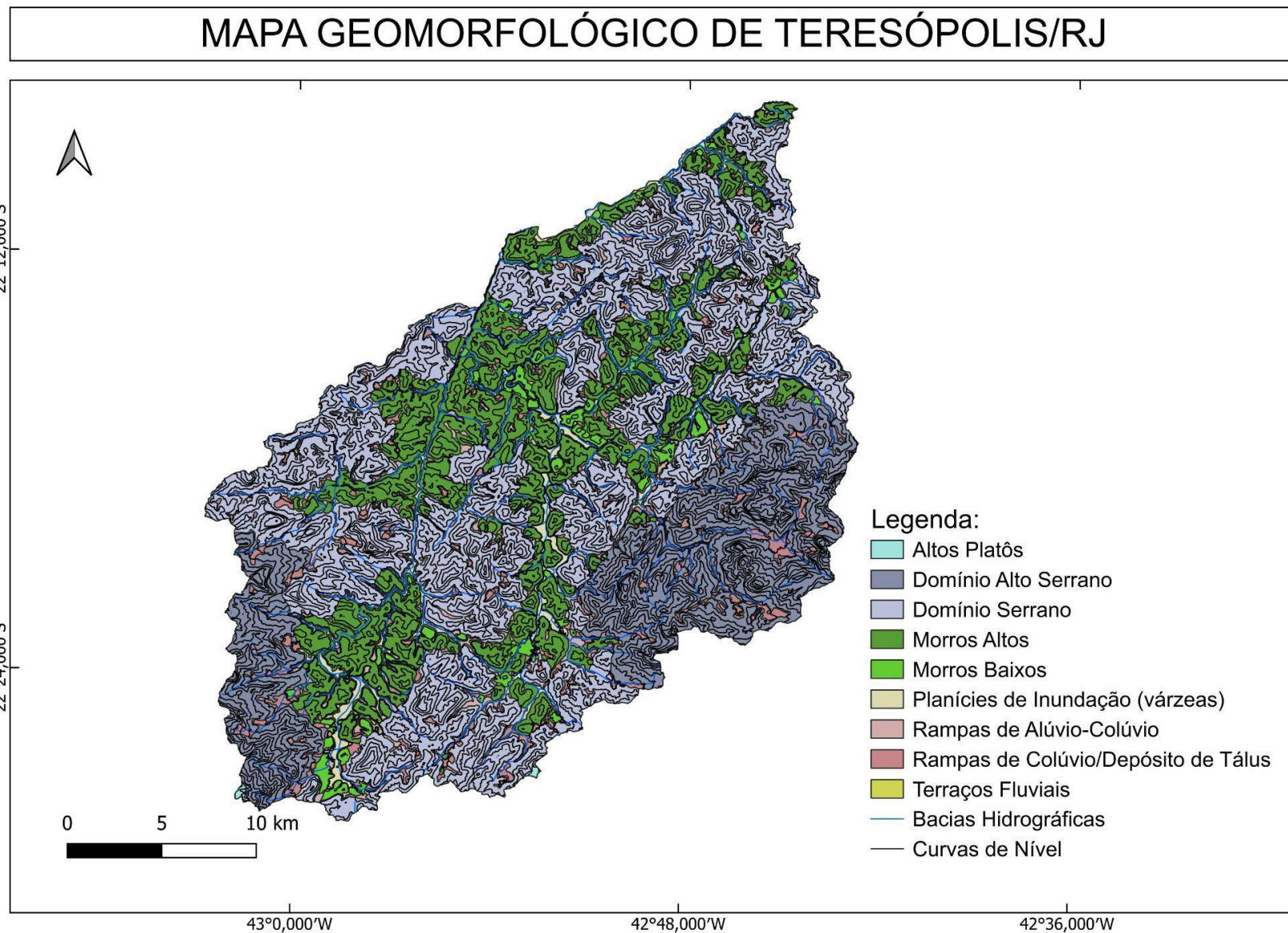


Figura 18 - Mapa geomorfológico do município de Teresópolis – RJ, apresentando as principais unidades de relevo e suas formas associadas. Elaborado pela autora com base no acervo disponibilizado pelo CRPM (2025)

4.3.2 Análise Geológica

O Mapa Geológico de Teresópolis (Figura 19) evidencia que o município está inserido no domínio do Cinturão Ribeira, onde predomina um embasamento cristalino ígneo-metamórfico intensamente fraturado e profundamente alterado (CPRM, 2014). Essa base rochosa, marcada por episódios sucessivos de intrusão, deformação e erosão, constitui um meio estrutural altamente vulnerável a processos de instabilização de encostas, especialmente quando associada à forte declividade típica da Serra dos Órgãos.

As principais unidades litológicas — Complexo Rio Negro, Corpo Andorinha, Corpo Conselheiro Paulino, Granitos Frades, Serra da Onça e Teresópolis, Suíte Cordeiro e depósitos inconsolidados — representam diferentes fases da evolução geotectônica regional. Entre elas, destaca-se o Complexo Rio Negro, formado por ortognaisses e granitoides de médio a alto grau metamórfico, com forte bandamento e foliação, condições que favorecem o fraturamento profundo e o controle estrutural do relevo. Tais características condicionam a concentração de drenagem e aumentam a suscetibilidade a movimentos gravitacionais (CPRM, 2014).

Os Corpos Andorinha e Conselheiro Paulino, compostos por granitos porfíricos intensamente fraturados e alterados, apresentam redução da resistência mecânica devido à recristalização parcial e à presença de zonas hidrotermais. Em áreas de forte inclinação, essas propriedades litológicas se tornam determinantes para rupturas, especialmente sob eventos de chuva extrema — como discutido por Augusto Filho (1992) e Selby (1993), que relacionam fraturamento e intemperismo avançado ao desencadeamento de escorregamentos.

As intrusões graníticas da Serra dos Órgãos (Granito Frades, Granito Serra da Onça e Granito Teresópolis) formam a estrutura rígida das maiores elevações do município. Apesar de mais resistentes, essas unidades também apresentam sistemas de fraturas abertas que funcionam como vias de infiltração, intensificando o aumento de poro-pressão durante chuvas prolongadas, condição crítica para rupturas em massa (Crosta & Frattini, 2008).

Nas áreas de sopé e fundos de vale predominam Depósitos Colúvio-Aluvionares e de Tálus, formados por materiais inconsolidados — areias, argilas, blocos e cascalhos. Essas unidades são altamente suscetíveis à saturação e à liquefação,

constituindo as zonas onde os efeitos dos deslizamentos se tornam mais devastadores. Durante eventos extremos, como o desastre de 2011 na Região Serrana, foram justamente esses setores que sofreram maior mobilização e deposição de detritos, conforme analisado por Coelho Netto et al. (2011).

A integração das características litológicas, estruturais e superficiais demonstra que Teresópolis apresenta uma configuração geológica intrinsecamente frágil, marcada por:

- rochas fraturadas, alteradas e com baixa coesão estrutural;
- solos rasos desenvolvidos sobre encostas íngremes;
- canais de drenagem encaixados e de resposta rápida;
- depósitos inconsolidados que funcionam como gatilhos e receptores de fluxos de massa.

Esses elementos definem um quadro geotécnico crítico, no qual eventos de chuva intensa rapidamente se transformam em desastres naturais. Autores como Dias, Hölbling e Grohmann (2021) demonstram que a combinação entre litologia fraturada, intemperismo acentuado e alterações antrópicas acelera a deflagração de escorregamentos — padrão que se reproduz em diversos municípios da Serra do Mar.

Em síntese, compreender a geologia de Teresópolis é essencial para orientar o planejamento urbano, evitando ocupações sobre setores estruturalmente instáveis. A sobreposição entre expansão urbana e áreas de fragilidade, evidenciada pelos dados da CPRM (2014), reforça a necessidade de políticas públicas baseadas em diagnósticos geotécnicos robustos, mapeamento de risco atualizado e estratégia permanente de redução de desastres.

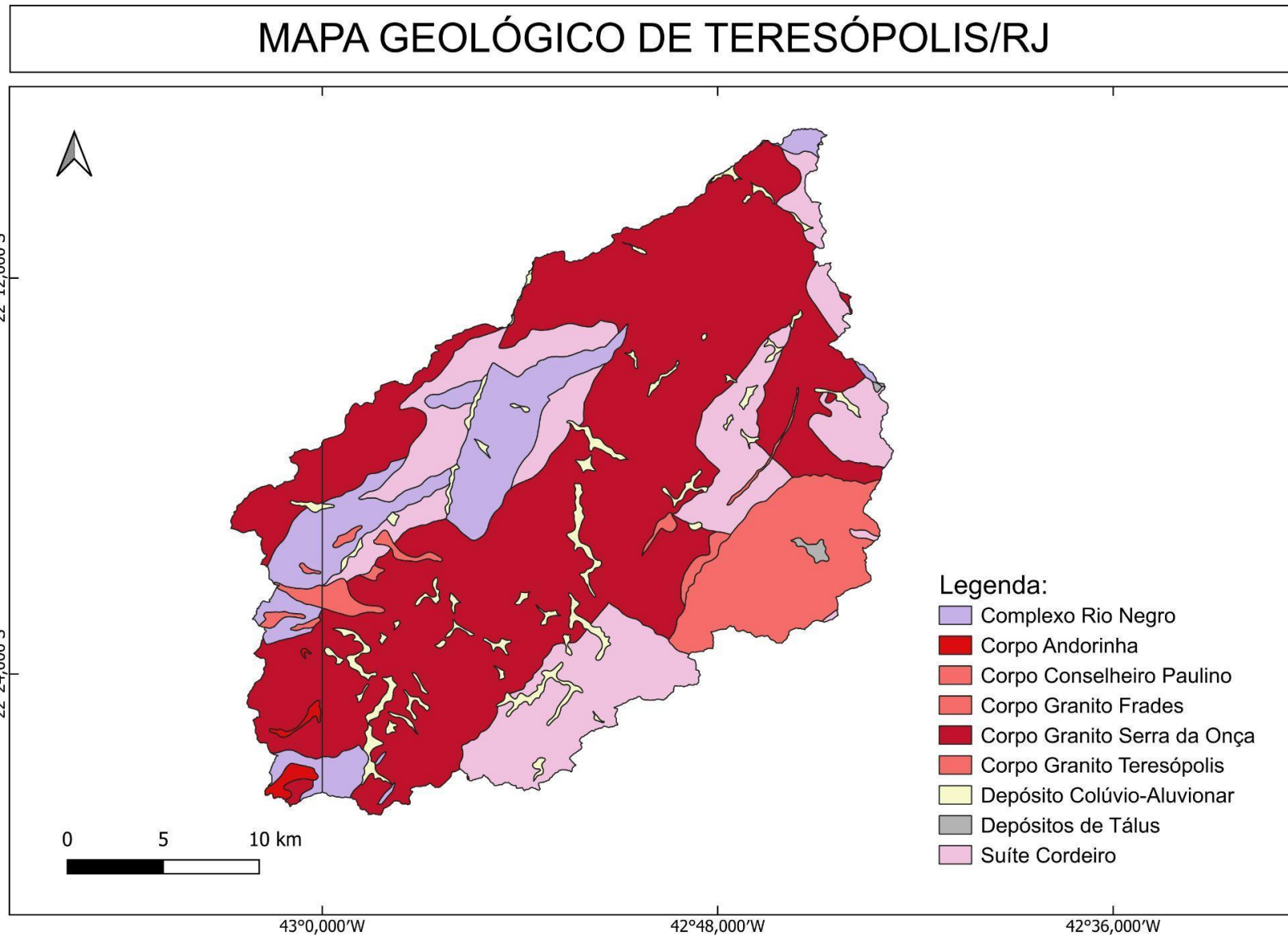


Figura 19 - Mapa geológico do município de Teresópolis – RJ, apresentando as principais unidades litológicas e estruturas. Elaborado pela autora (2025).

4.3.3 Análise Pedológica

O Mapa Pedológico (Figura 23) revela a predominância de Cambissolos, Latossolos e Argissolos, distribuídos de acordo com o gradiente de altitude e declividade.

Os Latossolos, comuns nas porções mais altas e suavemente onduladas, apresentam boa drenagem e estabilidade física, mas baixa fertilidade natural. Já os Cambissolos, amplamente distribuídos nas encostas, possuem baixo grau de desenvolvimento e estrutura frágil, tornando-se suscetíveis à erosão e à perda de material superficial (Fernandes Filho et al., 2023).

Nas áreas intermediárias, ocorrem Argissolos com horizontes texturais contrastantes e propensão à compactação. Santos, Hartwig e Espinoza (2024) destacam que solos jovens e rasos, como os Cambissolos e Argissolos, sofrem rápida degradação estrutural quando expostos à ocupação urbana e à supressão da vegetação. Essa fragilidade natural, aliada à topografia íngreme, aumenta a vulnerabilidade do terreno à erosão e à instabilidade.

A relação direta entre relevo, litologia e pedogênese observada em Teresópolis evidencia a importância de análises integradas para subsidiar políticas de manejo e uso do solo voltadas à mitigação de riscos ambientais.

MAPA PEDOLÓGICO DE TERESÓPOLIS/RJ

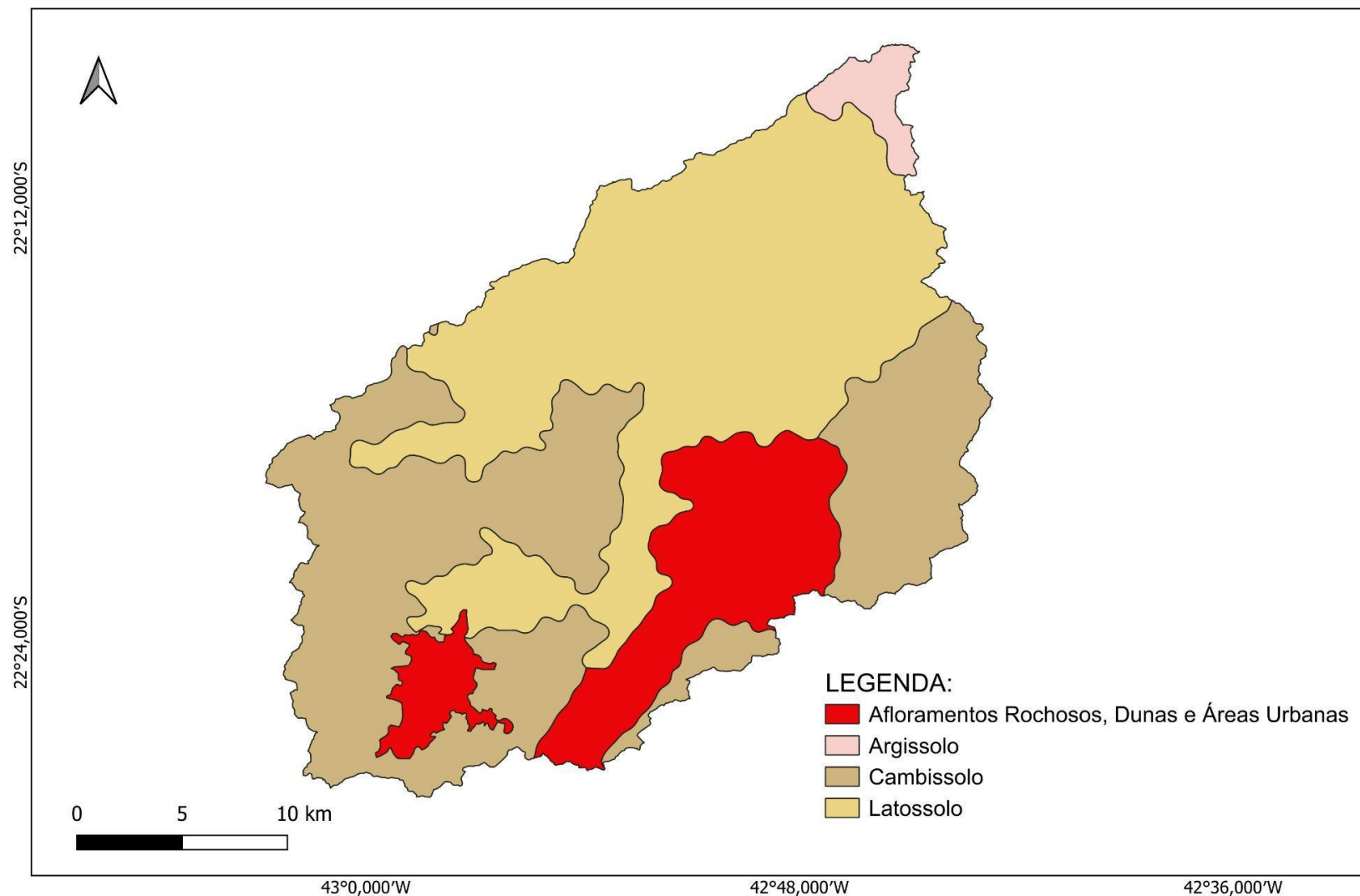


Figura 20 - Mapa pedológico do município de Teresópolis – RJ, mostrando a distribuição das principais classes de solos da região. Elaborado pela autora (2025).

4.3.4 Análise de Declividade

A análise da declividade consiste em uma etapa fundamental nos estudos geomorfológicos, pois permite compreender o comportamento das vertentes, as dinâmicas erosivas e as fragilidades associadas ao uso e ocupação do solo (Ross, 1994; Valeriano, 2008). Em regiões montanhosas, como Teresópolis/RJ, a variação angular das vertentes exerce influência direta na suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa, no escoamento superficial e na eficiência da infiltração hídrica — tornando-se, portanto, um elemento chave de diagnóstico territorial (Christofolletti, 1980).

O mapa de declividade foi gerado a partir do Modelo Digital de Elevação Copernicus DEM com resolução de 30 metros, processado no software QGIS. A análise foi estruturada considerando classes de declividade em graus, compatíveis com a literatura geomorfológica brasileira e amplamente aplicadas em estudos de análise geoambiental, permitindo maior precisão na interpretação física do território.

Os resultados demonstram que Teresópolis apresenta significativa predominância de áreas com declividades médias, fortes e muito fortes, associadas ao relevo serrano característico do domínio geomorfológico da Serra do Mar. Essa configuração reforça a restrição natural à expansão urbana horizontal, comum em municípios de topografia acidentada, além de acentuar a sensibilidade do território quanto a processos erosivos, movimentos de massa, riscos hidrológicos e pressão de usos conflitantes em ambiente serrano.

A análise da declividade, portanto, assume papel central no planejamento territorial e na gestão ambiental, sobretudo em áreas serranas como Teresópolis. Ao identificar zonas de maior fragilidade geomorfológica, o estudo permite antecipar riscos, orientar a ocupação urbana, subsidiar projetos de engenharia e estabelecer diretrizes para conservação dos recursos naturais. Além disso, a declividade funciona como variável integradora entre geologia, pedologia, hidrologia e uso do solo, sendo indispensável para compreender a dinâmica dos processos superficiais e para embasar tomadas de decisão que priorizem segurança, sustentabilidade e redução de desastres.

Tabela 3 - Classes e Interpretação Geomorfológica.

Classe	Intervalo (°)	Interpretação Geomorfológica / Uso
Plano / Suave ondulado	0 – 6°	Áreas favoráveis ao uso urbano e atividades agrícolas mecanizadas
Ondulado	6 – 12°	Transição; permite uso agropecuário com manejo conservacionista
Moderadamente íngreme	12 – 20°	Uso restrito; maior controle de solo e drenagem necessário
Íngreme	20 – 30°	Alta limitação ao uso antrópico; risco erosivo elevado
Muito íngreme / escarpado	> 30°	Áreas críticas para ocupação; processos geodinâmicos acentuados

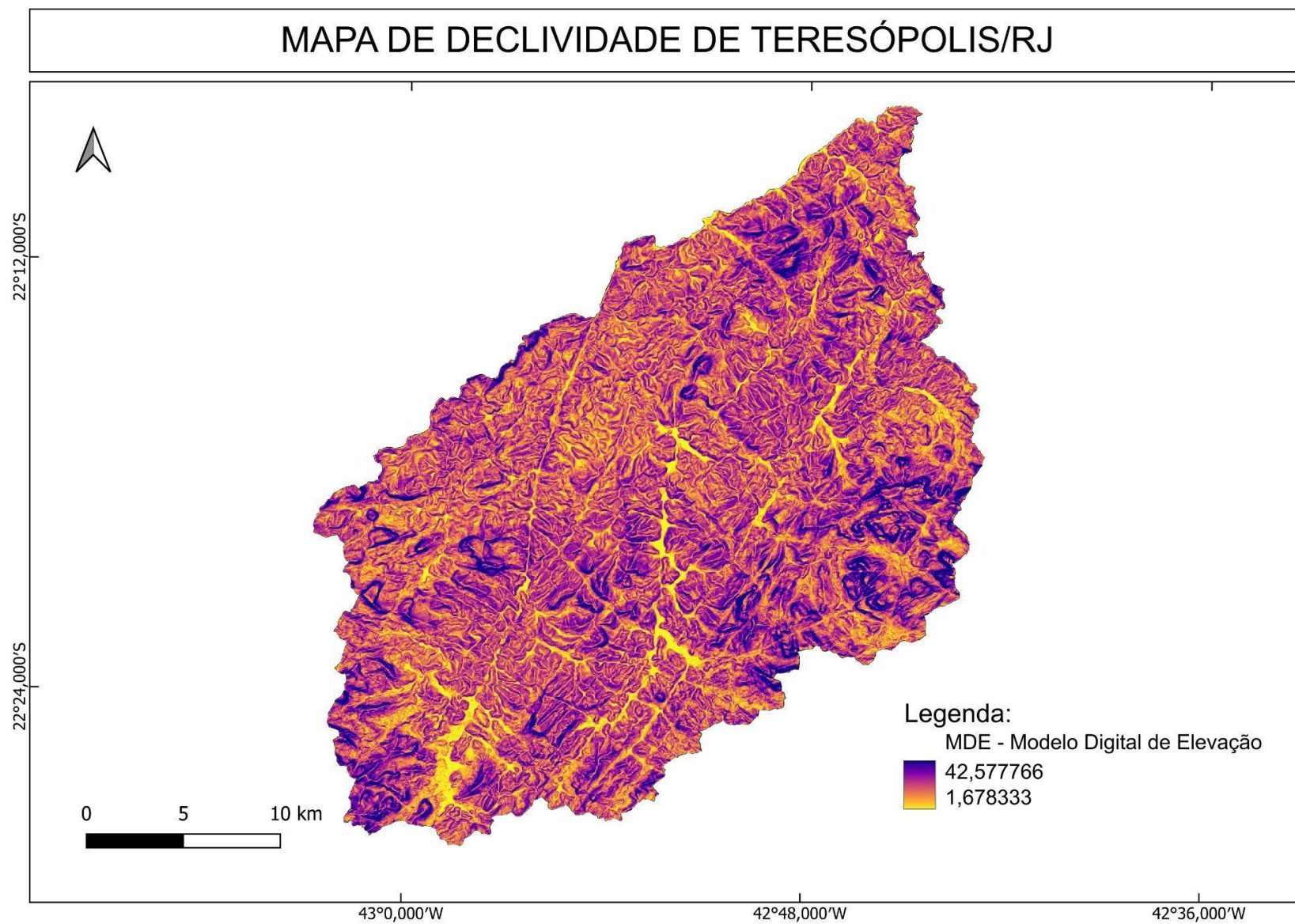


Figura 21- Mapa de declividade do município de Teresópolis – RJ, indicando as diferentes classes de inclinação do ambiente. Elaborado pela autora (2025).

5. CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que o processo de urbanização em Teresópolis (RJ), entre 1985 e 2025, ocorreu de forma caracterizada pela expansão de áreas urbanas sobre zonas de alta fragilidade geomorfológica e ambiental, confirmando a hipótese central deste trabalho. A análise integrada dos índices espectrais NDVI e NDBI demonstrou a substituição gradual da vegetação nativa por superfícies construídas e impermeáveis, evidenciando a perda de cobertura vegetal e o avanço da ocupação em encostas e vales. Essa dinâmica intensificou a exposição a processos erosivos, escorregamentos e à perda de estabilidade das vertentes, configurando um quadro típico de vulnerabilidade socioambiental, conforme descrito por Gonçalves et al. (2022).

Os resultados indicam que a urbanização desordenada de Teresópolis reflete um padrão recorrente em cidades serranas brasileiras, no qual a desigualdade social, o déficit de planejamento urbano e a pressão sobre o meio físico se combinam para amplificar os riscos naturais. Conforme Moroz e Thieken (2024), a expansão urbana sem controle técnico e o adensamento em áreas de encosta geram segregação espacial e aumentam a exposição da população aos desastres. A ausência de diretrizes eficazes de uso e ocupação do solo, observada ao longo da série histórica analisada, contribuiu para a consolidação de áreas de risco que hoje exigem atenção prioritária do poder público.

A análise dos dados geológicos, geomorfológicos e pedológicos, aliada aos índices espectrais, reforçou a importância de se compreender o meio físico como base estruturante do planejamento territorial. Em Teresópolis, a presença de litologias graníticas e gnáissicas fraturadas, associadas a Latossolos e declividades superiores a 20°, constitui um conjunto de condicionantes naturais que impõem limites claros à ocupação. A supressão da vegetação sobre essas condições acentua a instabilidade geotécnica e potencializa os processos erosivos, como demonstrado também por Dias, Hölbling e Grohmann (2021) e Fernandes Filho et al. (2023).

Essas constatações reforçam o argumento de Machado et al. (2025), segundo os quais o planejamento urbano deve transcender a lógica reativa frente aos desastres e incorporar a redução de riscos como eixo estruturante das políticas públicas. No caso de Teresópolis, a falta de integração entre planejamento territorial, defesa civil e

políticas habitacionais evidencia a necessidade de uma abordagem preventiva, que reconheça a vulnerabilidade não apenas como resultado do relevo, mas como expressão da interação entre fatores físicos e sociais.

Dessa forma, a integração entre dados espectrais, geológicos, pedológicos e geomorfológicos mostrou-se uma metodologia eficaz para o diagnóstico ambiental e o apoio à tomada de decisão. Os mapas e índices gerados permitem identificar zonas prioritárias para conservação, reflorestamento e controle de ocupação, oferecendo subsídios técnicos ao poder público para revisões do Plano Diretor Municipal, definição de zonas de risco e de proteção ambiental, e formulação de estratégias de adaptação climática e prevenção de desastres.

Do ponto de vista científico, o trabalho contribui para o avanço das discussões sobre a integração entre geotecnologias e análise físico-ambiental, demonstrando o potencial do sensoriamento remoto como instrumento de apoio à gestão territorial em municípios de relevo complexo. Do ponto de vista social, reafirma a necessidade de alinhar o desenvolvimento urbano à sustentabilidade ecológica e à segurança da população.

Conclui-se, portanto, que a vulnerabilidade ambiental de Teresópolis não é um fenômeno natural inevitável, mas o resultado da ação humana em desacordo com os limites do território. O conhecimento técnico produzido por meio desta pesquisa representa um passo significativo em direção a um modelo de planejamento urbano preventivo e sustentável, capaz de reduzir riscos, proteger ecossistemas e construir cidades mais resilientes, inclusivas e ambientalmente equilibradas.

6. REFERÊNCIAS

AUGUSTO FILHO, O.; GUERRA, A. J. T. *Movimentos gravitacionais de massa: bases conceituais e aplicações no Brasil*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2012.

AMARAL, Cláudio. **Risco a escorregamentos nas encostas de Teresópolis**. *Revista de Ciência, Tecnologia e Inovação*, Teresópolis: Centro Universitário Serra dos Órgãos (UNIFESO), v. 2, n. 2, p. 45–56, 2016.

AIRES, J. R. et al. **Análises geomorfológicas do Platô de Teresópolis e da Serra do Mar, RJ, com o auxílio de Seppômen e ASTER GDEM e sua relação aos tectonismos cenozoicos**. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, v. 35, n. 2, p. 105–123, 2012.

BASTOS MOROZ, C.; THIEKEN, A. H. **Crescimento urbano e segregação espacial aumentam o risco de desastres: lições aprendidas com o desastre de 2023 no litoral norte de São Paulo, Brasil.** *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 24, p. 3299–3315, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-24-3299-2024>.

BASTOS MOROZ, C.; THIEKEN, A. H. **Crescimento urbano e segregação espacial aumentam o risco de desastres: lições aprendidas com o desastre de 2023 no litoral norte de São Paulo, Brasil.** *EGUsphere [preprint]*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-1188>.

COELHO NETTO, A. L. *Hidrogeomorfologia e riscos naturais na Região Serrana do Rio de Janeiro*. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 6, n. 2, p. 45–60, 2005.

CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Mapa geológico do estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: CPRM, 2014.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa geológico do estado do Rio de Janeiro**. Brasília: CPRM, 2018.

DIAS, A. C.; HÖBLING, D.; GROHMANN, C. H. R. **Landslide susceptibility mapping in Brazil: a review.** *Geosciences*, v. 11, n. 9, p. 203, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences11100425>.

FERNANDES FILHO, E. I. et al. **The future of Brazilian pedology: pedometrics and advanced methods for soil survey.** In: SCHAEFER, C. E. G. R. (ed.). *The Soils of Brazil*. Cham: Springer, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-19949-3_16.

GUHA, S.; GOVIL, H.; DEY, A.; GILL, N. **Estudo analítico da temperatura da superfície terrestre com NDVI e NDBI usando dados Landsat 8 OLI e TIRS nas cidades de Florença e Nápoles, Itália.** *Revista Europeia de Sensoriamento Remoto*, v. 51, n. 1, p. 667–678, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160304987>.

GUIMARÃES, L.; DIAS, L. R.; HONORATO, P. S.; VIEIRA, J. R.; AVELAR, A. de S. **Mapeamento geomorfológico preliminar em domínio montanhoso da região serrana fluminense, bacia hidrográfica do Rio das Bengalas – Teresópolis (RJ).** In: *14^o SINAGEO – Simpósio Nacional de Geomorfologia*, Corumbá (MS), 24–30 ago. 2023. Anais... Corumbá: [s.n.], 2023. p. 485–492.

HUETE, A. et al. **Visão geral do desempenho radiométrico e biofísico dos índices de vegetação MODIS.** *Remote Sensing of Environment*, v. 83, p. 195–213, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2).

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e Estados: Teresópolis (RJ)**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Banco de Dados Geográficos – BDG**. São José dos Campos: INPE, 2020.

LEITE, A. C. S.; GALVÍNIO, J. D. **Desempenho entre índices espectrais de vegetação no mapeamento da cobertura arbórea para classificação dos serviços ecossistêmicos**. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 18, n. 5, p. 4172–4186, 2023. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbqf.v18.05.p4172-4186>.

MAPBIOMAS. **Coleção 9 – Uso e Cobertura da Terra do Brasil (1985–2023)**. São Paulo: Projeto MapBiomass, 2023.

MARANDOLA JR., E.; OJIMA, R. **Pendularidade e vulnerabilidade na Região Metropolitana de Campinas: repercussões na estrutura e no habitar urbano**. *Revista Brasileira de Estudos de População*, v. 16, n. 2, p. 185–204, 2014. DOI: <https://doi.org/10.22296/2317-1529.2014v16n2p185>.

MOHIUDDIN, G.; MUND, J.-P.; RAHAMAN, K. J. **Detection of urban expansion using the indices-based built-up index derived from Landsat imagery in Google Earth Engine**. *GI_Forum*, v. 2, p. 18–31, 2023.

MOHIUDDIN, G.; MUND, J.-P. **Land surface temperature response to land use and land cover changes: a remote sensing approach**. *Remote Sensing*, v. 16, n. 7, p. 1286, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16071286>.

ROSI, A. et al. **Landslides in the mountain region of Rio de Janeiro: a proposal for the semi-automated definition of multiple rainfall thresholds**. *Geosciences*, v. 9, n. 203, p. 1–15, 2019.

SANTOS, R. J. A.; CORTESE, T. T. **Planejamento urbano e gestão de riscos: perspectivas para cidades resilientes no Brasil**. *Revista Brasileira de Planejamento Urbano e Regional*, v. 14, n. 2, p. 188–207, 2022. DOI: <https://doi.org/10.17271/23188472107820223265>.

VISSIRINI, F. S. B. et al. **Vulnerabilidade urbana e ferramentas aplicadas na gestão de risco de desastres hidrometeorológicos**. *J. Environ. Manag. & Sust.*, v. 12, n. 2, p. 1–37, e22616, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5585/2023.22616>.

WISNER, B.; BLAIKIE, P.; CANNON, T.; DAVIS, I. **Em risco: perigos naturais, vulnerabilidade das pessoas e desastres**. Londres: Psychology Press, 2004.

ZHA, Y.; GAO, J.; NI, S. **Utilização do índice de área construída por diferença normalizada no mapeamento automático de áreas urbanas a partir de imagens TM**. *International Journal of Remote Sensing*, v. 24, n. 3, p. 583–594, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160304987>.