

UFRRJ

**PRÓ-REITORIA DE EXTENSÃO
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO,
LEVANTAMENTO E INTERPRETAÇÃO DE SOLOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Identificação de Trechos Críticos em Estradas de
Terra Utilizando Análise Multicritério na
Microbacia Valão da Jabuticaba no Município de
Itaperuna-RJ**

Felipe Sinbo Hanashiro

2025



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
PRÓ-REITORIA DE EXTENSÃO
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO,
LEVANTAMENTO E INTERPRETAÇÃO DE SOLOS**

**IDENTIFICAÇÃO DE TRECHOS CRÍTICOS EM ESTRADAS DE
TERRA UTILIZANDO ANÁLISE MULTICRITÉRIO NA MICROBACIA
VALÃO DA JABUTICABA NO MUNICÍPIO DE ITAPERUNA-RJ**

FELIPE SINBO HANASHIRO

Sob a Supervisão do Professor
Gustavo Souto Perdigão Granha

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido como requisito parcial para
obtenção do título de **Especialista** em
Geoprocessamento, Levantamento e
Interpretação de Solos.

Seropédica, RJ
Julho de 2025



ESPECIALIZAÇÃO
Geoprocessamento, levantamento e
interpretação de solos

UFRRJ - UFMS - UFV - UFPA



Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central/Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
Com os dados fornecidos pelo autor

H233i Hanashiro, Felipe Sinbo, 12/03/1984-
Identificação de trechos críticos em estradas de terra utilizando análise multicritério na microbacia Valão da Jabuticaba no município de Itaperuna - RJ / Felipe Sinbo Hanashiro. - Seropédica, 2025.
69 f.: il.
Orientador: Gustavo Souto Perdigão Granha.
Trabalho de conclusão de curso (Especialização). -- Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Especialização em Geoprocessamento, Levantamento e Interpretação de Solos, 2025.

1. Estradas - manutenção e reparos. 2. AHP. 3. Suscetibilidade a defeitos. 4. Sistema de Informações Geográficas. 5. Planejamento territorial. I. Granha, Gustavo Souto Perdigão, 19/02/1975-, orient. II Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Especialização em Geoprocessamento, Levantamento e Interpretação de Solos III. Título.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

É permitida a cópia parcial ou total deste documento, desde que seja citada a fonte.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
PRÓ-REITORIA DE EXTENSÃO
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO, LEVANTAMENTO
E INTERPRETAÇÃO DE SOLOS**

Folha de aprovação

FELIPE SINBO HANASHIRO

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi submetido como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Geoprocessamento, Levantamento e Interpretação de Solos.

TCC APROVADO EM 17 de JULHO de 2025.

Prof. Gustavo Souto Perdigão Granha
(Supervisor)

Prof.^a Niriele Bruno Rodrigues
Instituição UFRRJ

Prof.^a Mariana Oliveira da Costa
Instituição UERJ

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, dedico esta conquista à minha família. Agradeço profundamente à minha esposa, Natieli, e aos meus amados filhos, Davi, Mariana e Vinicius, por toda a paciência, amor e apoio incondicional que foram meu alicerce e motivação ao longo desta jornada. Aos meus pais, minha eterna gratidão pelo incentivo, suporte e por todos os valores que me transmitiram. Expresso meus sinceros reconhecimentos ao corpo docente do curso. Agradeço a todos os professores e tutores pelos valiosos ensinamentos. Em especial, registro minha gratidão ao meu orientador, Professor Dr. Gustavo Souto Perdigão Granha, pela confiança, pela orientação precisa e pela parceria na construção deste trabalho. Agradeço também à Emater-Rio pelo apoio e pela oportunidade de crescimento profissional proporcionada durante o curso.

Aos meus colegas de turma, sou grato pelo companheirismo, pela troca de experiências e pelo apoio mútuo que tornaram o caminho mais leve e enriquecedor.

Por fim, agradeço a Deus, por me conceder força, saúde e por todas as bênçãos que iluminaram meu caminho e me permitiram chegar até aqui.

RESUMO

HANASHIRO, Felipe Sinbo. **Identificação de trechos críticos em estradas de terra utilizando análise multicritério na microbacia Valão da Jabuticaba no município de Itaperuna – RJ.** 2025. 69f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Geoprocessamento, Levantamento e Interpretação de Solos). Pró-reitoria de Extensão, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2025.

O presente trabalho teve como objetivo a elaboração de uma representação espacial para identificar trechos críticos em estradas de terra na microbacia Valão da Jabuticaba, em Itaperuna-RJ, utilizando geoprocessamento e análise multicritério como uma alternativa de baixo custo para a gestão viária municipal. A metodologia baseou-se no Processo Analítico Hierárquico (AHP) para ponderar nove variáveis ambientais (solos, erodibilidade, geologia, uso e cobertura do solo, declividade, aspecto, curvatura, TPI e TWI), que foram agregadas por Combinação Linear Ponderada (CLP) para gerar um mapa de suscetibilidade a defeitos. Os resultados apontaram as variáveis geomorfométricas, com destaque para a declividade, como as mais influentes na degradação das estradas, e classificaram 51,64% dos trechos como de "Alta" suscetibilidade e 25,71% como de "Muito Alta" suscetibilidade. A validação, realizada com dados de campo e análise ROC/AUC, confirmou a capacidade do modelo em identificar áreas de risco, especialmente as de criticidade moderada e muito alta. O mapa de trechos críticos gerado demonstrou ser uma ferramenta robusta para o planejamento de manutenção, permitindo a otimização de recursos ao direcionar as ações para os locais com maior probabilidade de desenvolvimento de defeitos severos, auxiliando na tomada de decisão e no monitoramento sistemático.

Palavras-chave: Suscetibilidade a defeitos. AHP. Manutenção de estradas. Sistema de Informações Geográficas. Planejamento territorial.

ABSTRACT

HANASHIRO, Felipe Sinbo. **Identification of Critical Unpaved Road Sections Using Multi-Criteria Analysis in the Valão da Jabuticaba Watershed, Itaperuna-RJ.** 2025. 69p. Trabalho de Conclusão de Curso (Specialization in Geoprocessing, Soil Survey and Interpretation) Pró-reitoria de Extensão, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2025.

This study aimed to develop a spatial representation to identify critical sections on unpaved roads in the Valão da Jabuticaba watershed, Itaperuna-RJ, using geoprocessing and multi-criteria analysis as a low-cost alternative for municipal road management. The methodology was based on the Analytic Hierarchy Process (AHP) to weigh nine environmental variables (soils, erodibility, geology, land use and cover, slope, aspect, curvature, TPI, and TWI), which were aggregated through a Weighted Linear Combination (WLC) to generate a defect susceptibility map. The results indicated geomorphometric variables, particularly slope, as the most influential in road degradation, and classified 51.24% of the sections as having "High" susceptibility and 25.71% as having "Very High" susceptibility. The validation, carried out with field data and ROC/AUC analysis, confirmed the model's ability to identify at-risk areas, especially those with moderate and very high criticality. The resulting map of critical sections proved to be a robust tool for maintenance planning, enabling resource optimization by directing actions to locations with a higher probability of developing severe defects, thereby aiding in decision-making and systematic monitoring.

Keywords: Defect susceptibility. Analytic Hierarchy Process. Road maintenance. Geographic Information System. Territorial planning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Mapa de localização da microbacia hidrográfica Valão da Jabuticaba.	11
Figura 2- Mapa das estradas da MBH Valão da Jabuticaba.	12
Figura 3- Mapa hipsométrico da MBH Valão da Jabuticaba.	13
Figura 4- Mapa de classificação do relevo da MBH Valão da Jabuticaba.	14
Figura 5- Mapa de solos da MBH Valão da Jabuticaba.	16
Figura 6- Mapa de classes de erodibilidade (K) da MBH Valão da Jabuticaba.	17
Figura 7- Mapa geológico da MBH Valão da Jabuticaba.	19
Figura 8- Mapa de uso e cobertura do solo da MBH Valão da Jabuticaba.	20
Figura 9- Mapa de declividade da MBH Valão da Jabuticaba.	22
Figura 10- Mapa de aspecto da MBH Valão da Jabuticaba.	23
Figura 11- Classificação das formas do terreno conforme os planos de curvatura e perfis de curvatura.	24
Figura 12- Mapa de classificação de curvatura.	25
Figura 13- Mapa de índice de posição topográfico (TPI).	26
Figura 14- Mapa de índice de umidade topográfico (TWI).	27
Figura 15- Mapas das variáveis normalizadas solos, erodibilidade (K) e geologia.	35
Figura 16- Mapa das variáveis normalizadas uso e cobertura do solo, declividade e aspecto.	36
Figura 17- Mapas das variáveis normalizadas curvatura, TPI e TWI.	37
Figura 18- Mapa de classificação de Suscetibilidade a Defeitos.	40
Figura 19- Mapa de classificação de suscetibilidade a defeitos das estradas de terra.	42
Figura 20- Mapa dos trechos críticos identificados nas estradas de terra.	43
Figura 21- Mapa dos pontos levantados nas estradas de terra.	44
Figura 22- Trecho da estrada Valão da Jabuticaba com a presença de buracos severos.	46
Figura 23- Trecho da estrada Valão da Jabuticaba com formação de areiões.	46
Figura 24- Trecho da estrada Valão da Jabuticaba x Colibri com atoleiros.	47
Figura 25- Trecho da estrada Valão da Jabuticaba apresentando erosão em sulcos.	47
Figura 26- Trecho da estrada Valão da Jabuticaba x Colibri apresentando pista de escorregadia.	48
Figura 27- Trecho da estrada Valão da Jabuticaba com afloramento de rochas.	48

Figura 28- Gráfico da análise ROC/AUC Um-vs-Todos das classes 3 (Moderado), 4 (Alto) e 5 (Muito alto)..... 49

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Escala absoluta, definição e justificativa para comparação pareada no método AHP.	29
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Tabela de classificação de estradas de terra conforme metodologia adaptada GPM.	30
Tabela 2- Coeficientes de normalização da variável solos.....	32
Tabela 3- Coeficientes de normalização da variável erodibilidade (K).	32
Tabela 4- Coeficientes de normalização da variável geologia.	32
Tabela 5- Coeficientes de normalização da variável uso e cobertura do solo.....	33
Tabela 6- Coeficientes de normalização da variável declividade.....	33
Tabela 7- Coeficientes de normalização da variável aspecto.	33
Tabela 8- Coeficientes de normalização da variável curvatura.	34
Tabela 9- Coeficientes de normalização da variável TPI.	34
Tabela 10- Coeficientes de normalização da variável TWI.....	34
Tabela 11- Matriz de comparação pareada do método AHP e pesos ponderados das variáveis.	38
Tabela 12- Classificação dos pontos levantados em campo conforme metodologia adaptada GPM.	45

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	3
2.1 Características importantes das estradas de terra	3
2.2 Os defeitos em estradas de terra e suas causas	4
2.2.1 Ondulações ou corrugações (costelas de vaca)	4
2.2.2 Trilhas de rodas.....	4
2.2.3 Atoleiros	4
2.2.4 Buracos (panelas)	5
2.2.5 Areiões.....	5
2.2.6 Poeira.....	5
2.2.7 Segregação de agregados	5
2.2.8 Erosão em sulcos	6
2.2.9 Borrachudo	6
2.2.10 Queda de barreiras	6
2.2.11 Afloramento de rocha	7
2.2.12 Pista escorregadia.....	7
2.3 Aplicações da análise multicritério utilizando AHP em estradas de terra.....	7
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	10
3.1 Área de estudo.....	10
3.2 Caracterização das variáveis ambientais.....	15
3.2.1 Mapa de solos.	15
3.2.2 Mapa de erodibilidade (K)	15
3.2.3 Mapa geológico	18
3.2.4 Mapa de uso e cobertura do solo.	18
3.2.5 Modelo digital de elevação e extração das covariáveis ambientais.....	21
3.2.5.1 Mapa de declividade.	21
3.2.5.2 Mapa de aspecto.....	21
3.2.5.3 Mapa de curvatura.	24
3.2.5.4 Mapa de índice de posição topográfico (TPI).....	24
3.2.5.5 Mapa de índice de umidade topográfico (TWI).....	24

3.3	Mapeamento da suscetibilidade a defeitos.....	28
3.3.1	Normalização das variáveis.....	28
3.3.2	Priorização e ponderação das variáveis.....	28
3.3.3	Verificação da consistência	29
3.3.4	Agregação das variáveis	29
3.4	Identificação dos trechos críticos em estradas de terra.....	29
3.5	Avaliação das estradas em campo	30
3.6	Validação da metodologia	30
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1	Ponderação e análise das variáveis ambientais.....	31
4.2	Mapa de suscetibilidade a defeitos e identificação de trechos críticos.....	39
4.3	Validação da metodologia com dados de campo.....	44
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
7.	ANEXOS	55



1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um país de dimensões continentais com uma extensa malha viária que se estende por 1.563.600,00 km (desconsiderando as estradas planejadas). Deve-se ressaltar que destas, apenas 13,65% são estradas pavimentadas e 86,35% são estradas não pavimentadas (CNT, 2024). As estradas de terra desempenham um papel fundamental para o produtor rural que, através delas, escoar sua produção e recebe os insumos para as lavouras. Do ponto de vista social, elas garantem à população rural o acesso a serviços básicos, como saúde, educação e lazer. No aspecto ambiental, as estradas de terra são importantes fontes de sedimentos em cursos d'água, demandando as devidas medidas de proteção ambiental.

As estradas de terra, também conhecidas como estradas vicinais, estradas rurais, estradas de chão ou estradas não pavimentadas, são estradas sem revestimento betuminoso ou cimento Portland, com superfície de rolamento constituída por materiais integrantes do próprio leito natural ou revestimento primário de agregados naturais, de uma só pista, que fazem a interligação entre propriedades rurais, localidades próximas ou cidades vizinhas. Deve-se também destacar que possuem padrão técnico modesto, compatível com o tráfego que as utiliza (Brasil, 2021; DER/SP, 2012; DNIT, 2010).

A maioria das estradas de terra são o resultado da evolução de trilhas e caminhos precários, remanescentes de épocas pioneiras e construídas dentro de características técnicas bastante modestas. Basicamente orientadas pela estrutura fundiária da época e pelas facilidades da topografia, possuem traçados que acompanham o terreno natural e frequentemente atravessam locais cujos solos denotam grande fragilidade em termos de capacidade de suporte (Baesso e Gonçalves, 2003; DER/SP, 2012; DNIT, 2010).

Normalmente, tais estradas estão sob a responsabilidade dos municípios, que devido a falta de recursos financeiros, não possuem pessoal técnico capacitado e estrutura adequada para a realização dos serviços de manutenção e recuperação, resultando em condições precárias de trafegabilidade (Baesso e Gonçalves, 2003; DNIT, 2010; Oda, 1995). Não sendo realizada a manutenção preventiva, existe um aumento da demanda por manutenção corretiva e muitas vezes emergencial, fato que gera muitos transtornos e prejuízos.

Os principais defeitos nas estradas de terra são: as ondulações ou corrugações, trilhas de rodas, atoleiros, areiões, poeira, afloramento de rocha, buracos, segregação de agregados, valetas, queda de barreiras, borrachudo e erosões. Dentre as principais causas destes defeitos, estão a falta de capacidade de suporte do subleito, o mau desempenho da superfície de rolamento e a deficiência do sistema de drenagem (Santos et al., 2019).

Podemos definir os defeitos em estradas não pavimentadas, como qualquer alteração na superfície da via que impacte negativamente nas suas condições de tráfego, decorrentes da interação entre fatores extrínsecos (tráfego, chuva e manutenção) e intrínsecos (perfil longitudinal, perfil transversal, drenagem, tipo de solo e outros), tal como descreve Oda (1995).

Os aspectos da paisagem local (pedologia, geologia, geomorfologia, topografia, cobertura do solo e clima) condicionados pelo padrão técnico da estrada refletem na capacidade de suporte, na superfície de rolamento e no sistema de drenagem que, sob a ação do tráfego, da

manutenção, e do clima, dão origem aos diversos tipos de defeitos e seus graus de severidade, prejudicando as condições de fluxo.

Em pesquisa realizada com gestores municipais no Noroeste do Paraná, Oliveira (2022) concluiu que não havia gestão efetiva para a manutenção e conservação das estradas rurais nos municípios estudados, com a supressão das funções de planejamento, programação, preparação e operação.

A priorização dos serviços de manutenção e recuperação normalmente é realizada utilizando apenas critérios subjetivos. Como consequência, pode-se constatar que muitos trechos críticos acabam não sendo atendidos. Nesse sentido, a pesquisa em tela busca ser uma alternativa viável e de baixo custo para a identificação e priorização de trechos críticos em estradas de terra.

A presente investigação tem como objetivo principal a elaboração de uma representação espacial que sinaliza e identifica determinados segmentos ou trechos críticos em estradas de terra na microbacia Valão da Jabuticaba, no município de Itaperuna-RJ. Além disso, almeja-se a identificação dos principais defeitos nas estradas de terra da área em estudo, assim como analisar as diferentes variáveis ambientais atuantes no processo.

As estradas de terra possuem baixo padrão técnico e mantêm as características físicas do terreno natural. Assim sendo, as técnicas de geoprocessamento, associado ao método de análise multicritério, podem revelar segmentos críticos de estradas não pavimentadas, auxiliando, sobretudo, na segurança referente às atividades humanas, bem como na tomada de decisões que impactam diretamente na economia local, assim como no suporte ao monitoramento sistemático dos trechos em situação de risco.

Nesta pesquisa serão examinadas diferentes variáveis ambientais utilizando análise multicritério e técnicas de geoprocessamento, no intuito da obtenção do mapeamento de áreas suscetíveis a defeitos nas estradas de terra. Ao sobrepor a camada de estradas sob o mapa de áreas suscetíveis, realizar-se-á a identificação dos trechos críticos (trechos com maior potencial de ocorrência de defeitos).

A avaliação da suscetibilidade a defeitos será elaborada utilizando-se das seguintes variáveis ambientais: solos, erodibilidade (K), geologia, uso e cobertura do solo, declividade, aspecto, curvatura, índice de posição topográfico (TPI) e índice de umidade topográfico (TWI). A escolha das variáveis levou em consideração as referências bibliográficas, a disponibilidade de dados e a relação com as causas dos defeitos.

A metodologia a ser desenvolvida se baseará na utilização de técnicas de geoprocessamento e análise multicritério utilizando-se do Processo Analítico Hierárquico (Analytic Hierarchy Process - AHP), bem como a Combinação Linear Ponderada (CLP). Este trabalho será desenvolvido no software livre QGIS, assim como serão utilizados dados de fontes abertas.

As estradas de terra serão percorridas e avaliadas conforme a metodologia adaptada do Gravel PASER Manual (GPM). A classificação das estradas utilizando a metodologia AHP serão confrontadas com a avaliação utilizando a metodologia GPM adaptada, através da análise ROC/AUC.



2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Características importantes das estradas de terra

É notório entre os autores, que uma das características técnicas mais importantes em uma estrada de terra é o abaulamento da superfície de rolamento, que consiste em manter um caimento do centro para as laterais da estrada. Essa inclinação varia de 3 a 6% de declividade transversal, devendo essa declividade ser menor em solos arenosos e maior em solos argilosos. A função do abaulamento é drenar toda a água que precipita sobre a superfície da estrada, evitando assim a formação de poças de água e valetas (ARRB, 2020; Emater-MG, 2024; Keller e Sherar, 2003; Oda, 1995; Weaver et al., 2014).

A rampa máxima varia em função do volume de tráfego, do tipo de uso, e do relevo. Segundo Baesso e Gonçalves (2003) a declividade máxima varia de 4 a 12% de declividade para terrenos de topografia plana a montanhosa, podendo chegar ao máximo de 15% em trechos curtos (Keller e Sherar, 2003; Weaver et al., 2014).

Em estradas de terra deve-se manter o greide o mais próximo da superfície natural do terreno, reduzindo os custos e problemas de drenagem e evitando assim, atingir camadas dos solos com baixa capacidade de suporte e resistência a erosão. (Baesso e Gonçalves, 2003; Emater-MG, 2024).

A drenagem eficiente é um dos principais requisitos para manter uma estrada em boas condições de tráfego. O objetivo de um sistema de drenagem de uma estrada é guiar rapidamente e de forma segura a água precipitada na via para fora do leito da estrada. Além disso, também é utilizada para drenar a água acumulada subsuperficialmente. Os principais componentes de um sistema de drenagem superficial são o abaulamento, as sarjetas, as saídas d'água (bigodes) e os bueiros de greide e de transposição de talvegue (Baesso e Gonçalves, 2003; Emater-MG, 2024). Segundo Santos et al. (2019), as deficiências de drenagem sempre colaboram para o agravamento dos problemas, mesmo não sendo a sua causa original.

A capacidade de suporte diz respeito à propriedade dos materiais que compõem o subleito e a superfície de rolamento em manterem-se coesos frente as solicitações repetitivas do tráfego (Baesso e Gonçalves, 2003). Também pode ser definida de forma mais simples como a característica que confere à estrada sua capacidade maior ou menor de não se deformar frente às solicitações de tráfego (Santos et al., 2019). A capacidade de suporte depende da resistência do solo, da drenagem e as características de compactação do subleito (Weaver et al., 2014). Em solos com baixa capacidade de suporte é necessário a colocação de uma camada de reforço para aumentar a resistência estrutural da via e garantir uma base adequada para colocação do revestimento primário (Emater-MG, 2024).

As condições de rolamento e aderência estão relacionadas com a qualidade e composição do material da superfície de rolamento da estrada, podendo ser composta pelo próprio solo do leito natural ou camada de revestimento primário. As condições de rolamento estão relacionadas com a presença de irregularidades na pista (buracos, ondulações, materiais soltos, etc) que interferem negativamente sobre o conforto e a segurança do tráfego (Santos et al., 2019). A aderência é a característica da pista que diz respeito ao atrito entre os pneus dos veículos e a via, ou seja, uma pista com boa aderência não permite “patinação” das rodas dos



veículos (Baesso e Gonçalves, 2003; Santos et al., 2019). A superfície de rolamento deve ser lisa, firme e com boas condições de rolamento e atrito, evitando-se problemas de derrapagem dos pneus (Oda, 1995).

De acordo com Baesso e Gonçalves (2003) uma estrada rural ideal é aquela perfeitamente integrada ao contexto espacial de uma microbacia hidrográfica, de traçado harmônico, áreas marginais completamente protegidas e dotada de plataforma em padrão técnico compatível com sua função socioeconômica.

2.2 Os defeitos em estradas de terra e suas causas

2.2.1 Ondulações ou corrugações (costelas de vaca)

As ondulações ou corrugações (costelas de vaca) se caracterizam por ondulações transversais posicionadas em intervalos regulares, que provocam trepidação nos veículos. Conforme Oda (1995) a gravidade deste defeito varia de acordo com o espaçamento entre as ondulações e sua altura.

Os principais fatores relacionados à formação de corrugações são a falta de material ligante no revestimento ou superfície da estrada, bem como a ação do tráfego. O movimento vibratório transmitido pelos veículos à estrada, incluindo a vibração dos motores, o choque do veículo sobre o solo, a ação do molejo (suspensão) dos automóveis (cuja contribuição é expressiva), as forças de tração e frenagem, contribuem para movimentação dos agregados e a formação das ondulações transversais. Vale também ressaltar que geralmente surgem em trechos de aceleração e desaceleração, ultrapassagem, bem como em rampas e curvas, relacionados as características geométricas e locais (Oda, 1995).

2.2.2 Trilhas de rodas

Consistem em depressões em forma de valetas na superfície e subleito das estradas nas linhas longitudinais por onde passam repetidamente os pneus dos veículos (Oda, 1995).

Ocorrem principalmente pela baixa capacidade de suporte do solo e pela sobrecarga aplicada pelos pneus dos veículos. A presença de umidade devido a deficiência da drenagem acelera o processo (Buhler, 2023; Oda, 1995).

2.2.3 Atoleiros

Os atoleiros ocorrem em solos argilosos, devido a uma drenagem ineficiente e a presença de umidade. Se iniciam com a água empossada em buracos e trilhas de rodas, que pela ação sucessiva do tráfego de veículos, favorece a desestruturação do solo e a formação de uma lama pegajosa. Quanto maior a área e a profundidade dos atoleiros maior a dificuldade da passagem dos veículos (Buhler, 2023; Emater-MG, 2024; Oda, 1995; Santos et al., 2019).

2.2.4 Buracos (panelas)

Os buracos (também conhecidos como panelas) são depressões em formato de bacias na superfície das estradas de terra, normalmente menores que 100 cm de diâmetro (Oda, 1995).

Ocorrem principalmente em locais onde há empossamento de água, devido a drenagem ineficiente, má compactação e regularização da plataforma de rolamento mal executada. Os



buracos são causados pela desagregação e contínua expulsão de partículas sólidas quando da passagem de veículos (Santos et al., 2019).

Também ocorre nos períodos secos pelo desgaste da superfície de rolamento. O desgaste da superfície provoca o aparecimento de pequenas depressões, iniciando a formação dos buracos. A baixa qualidade do material de revestimento ou sua ausência e o empoçamento de água aceleram o processo de formação dos buracos (Oda, 1995; Santos et al., 2019).

2.2.5 Areiões

Os areiões se caracterizam por bancos ou camadas de areia solta na superfície da estrada. Podem ocorrer em trechos pequenos ou grandes extensões, tornando-se um sério problema para a segurança do tráfego, especialmente nos períodos de tempos secos ou de estiagens (Emater-MG, 2024; Santos et al., 2019). Eles ocorrem principalmente em regiões de solos arenosos, onde a porcentagem de argila (material ligante ou cimentante) é muito baixa ou inexistente (Emater-MG, 2024; Brasil, 2021; Santos et al., 2019).

Deve-se salientar que são causados pela ação combinada do tráfego e da água da chuva sobre o solo com baixo material ligante. Os areiões de espigão nas partes altas ocorrem pelo carregamento dos materiais finos e o acúmulo dos materiais mais grosseiros. Já os areiões de baixada, são causados pelo acúmulo da areia trazido da erosão das partes mais altas (Santos et al., 2019).

2.2.6 Poeira

O excesso de poeira é um dos defeitos mais comuns em estradas de terra, caracterizado pela liberação de partículas finas da superfície de rolamento, por ação mecânica, durante a passagem de veículos. Este problema é agravado em solos siltosos, e mais intenso nos períodos secos ou de estiagem (Silva et al., 2022).

A formação de nuvens de poeira é influenciada pela granulometria, pelo volume e velocidade do tráfego, e a umidade do solo (Buhler, 2023).

2.2.7 Segregação de agregados

A segregação de agregados é caracterizada pelo desprendimento do revestimento e a liberação dos agregados pela ação abrasiva do tráfego. Os agregados soltos são lançados para as laterais formando bermas (Oda, 1995; Silva et al., 2022).

A principal causa da segregação de agregados é a ausência de material ligante (como argila) em proporções adequadas na composição da mistura do revestimento. O material granular superficial, sem ligante, é lançado pelo tráfego para as laterais da estrada (Santos et al., 2019).

2.2.8 Erosão em sulcos

A erosão é um dos problemas mais severos e com o maior poder destrutivo que afetam as estradas de terra, podendo levar à completa interrupção do tráfego se não controlada. Podendo ocorrer na pista de rolamento, nos dispositivos de drenagem e nos taludes de corte e de aterro (Buhler, 2023; Santos et al., 2019).



Os processos erosivos surgem inicialmente na forma de sulcos, que são canais ou ranhuras formados na superfície da estrada ou em suas laterais pela ação do escoamento da água da chuva. Estes sulcos podem evoluir para formas de erosão mais avançadas e severas como as ravinas e, em casos extremos que atingem o lençol freático, as voçorocas (Santos et al., 2019; Verdum et al., 2016).

A erosão em sulcos na superfície de rolamento ocorre principalmente pela falta de abaulamento da seção transversal (fazendo com que a água corra sobre a superfície da estrada), a declividade longitudinal da estrada (quanto maior a declividade maior a velocidade da água) e a falta e/ou deficiência dos dispositivos de drenagem (que deixam a água se concentrar e ganhar velocidade). Um fator importante é a manutenção inadequada, que pelo patrolamento sistemático somente retirando material da estrada, provoca o seu afundamento, deixando o greide encaixado e dificultando a sua drenagem (Baesso e Gonçalves, 2003; Emater-MG, 2024; Oda, 1995; Santos et al., 2019).

A falta de revestimento adequado e ou de cobertura vegetal, deixam os dispositivos de drenagem e os taludes de corte e aterro desprotegidos e sujeitos a ação erosiva da água da chuva (Brasil, 2021; Emater-MG, 2024; Verdum et al., 2016).

O tipo de solo também influencia na maior ou menor suscetibilidade a erosão. Solos mais arenosos, com gradiente textural e solos mais rasos são mais propensos ao surgimento de processos erosivos (Brasil, 2021; Emater-MG, 2024; Santos et al., 2019).

2.2.9 Borrachudo

Os borrachudos são caracterizados pelo constante afundamento na pista de rolamento, devido a falta de capacidade de suporte do solo na presença de umidade constante, normalmente por causa da elevação do lençol freático em um ponto da estrada, mesmo em períodos secos. Estão relacionados a solos hidromórficos.

Enquanto não for realizado o rebaixamento do lençol freático e o reforço da base, o solo continua a afundar.

2.2.10 Queda de barreiras

As quedas de barreiras são desmoronamentos dos taludes de corte sobre as vias e ocorrem principalmente nos períodos chuvosos (Brasil, 2021).

Sua causa está relacionada ao tipo de solo, a inclinação e altura do talude, a falta de valetas de proteção de corte e a cobertura vegetal. Também está relacionado a intensidade e duração das chuvas (Brasil, 2021; Verdum et al., 2016).

2.2.11 Afloramento de rocha

A presença de rochas aflorantes ocorre em regiões onde a camada de solo é pouco espessa ou onde há uma grande quantidade de blocos de rocha disseminados no solo. Isso resulta em um leito irregular com pontas de pedras salientes e ou lajes de rocha, o que prejudica a trafegabilidade e a segurança da estrada (Santos et al., 2019; Silva et al., 2022).



Ocorre pela ação da erosão laminar, que retira a camada superficial do solo ou pela manutenção incorreta, pelo patrolamento repetitivo apenas retirando o material da superfície, rebaixando cada vez mais o greide da estrada (Santos et al., 2019).

2.2.12 Pista escorregadia

A ocorrência de pista escorregadia está associada a composição da sua camada superficial. Quando essa camada possui alta concentração de argila e ausência de material granular, o excesso de umidade provoca a perda de aderência, resultando em uma superfície lisa (Santos et al., 2019).

2.3 Aplicações da análise multicritério utilizando AHP em estradas de terra

A análise multicritério (AMC) é uma ferramenta aplicada na tomada de decisões complexas, que envolvem a análise e combinação de variáveis de diversas origens. Dentre os métodos de análise multicritério mais utilizados e difundidos globalmente, destaca-se o Processo Analítico Hierárquico ou em inglês Analytic Hierarchy Process (AHP), desenvolvido por T. L. Saaty na década de 1970, nos Estados Unidos (Saaty, 1987).

De acordo com Saaty (1987), em sua forma geral, o AHP é uma estrutura não linear para a execução do pensamento dedutivo e indutivo sem o uso do silogismo, levando vários fatores em consideração simultaneamente e permitindo a dependência e o feedback, bem como fazendo compensações numéricas para chegar a uma síntese ou conclusão.

O AHP consiste em decompor um problema em subproblemas, e em seguida, agregar as soluções de todos os subproblemas em uma conclusão. No AHP, o problema é estruturado como uma hierarquia e por um processo de priorização (Saaty, 1994).

O AHP, de acordo com Abdi et al. (2009), foi desenvolvido especificamente para fornecer uma abordagem consistente e quantificável para problemas que envolvam a análise multicritério.

Conforme Coulter et al. (2006) uma das vantagens do AHP é que os atributos podem ser quantitativos ou qualitativos e podem ser medidos em qualquer escala, desde que essa escala seja constante dentro de cada atributo. Ainda de acordo com Saaty (1987), os atributos podem ser discretos ou contínuos.

As aplicações da análise multicritério utilizando AHP em estradas de terra envolvem a análise da componente espacial, utilizando os Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Os exemplos de aplicações vão desde o planejamento e avaliação de novas estradas, a classificação de estradas existentes, a priorização e gestão da manutenção, a análise de impactos ambientais, sociais e econômicos, a locação de dispositivos de conservação do solo e água, a suscetibilidade a deslizamentos e até questões de percepção dos stakeholders.

Abdi et al. (2009) utilizaram a análise multicritério para projetar uma rede de estradas florestais com o menor custo de construção, mantendo outros requisitos técnicos, na província de Mazandaran, ao sul do Mar Cáspio, no Irã. Eles utilizaram os fatores declividade, solo, geologia, aspecto, altitude e volume em pé (volume de madeira). Estes fatores foram ponderados e combinados em um mapa de adequação, e, através deste mapa, foram projetadas as diversas alternativas de estradas. Após definir os traçados, calcularam os custos de cada

alternativa. O fator declividade foi o que mais influenciou no custo e na escolha da melhor alternativa.

Samani et al. (2010) produziram um mapa de potencial de locação de estradas, em uma área de floresta temperada de montanha, na província de Guilan, no norte do Irã. Foram utilizados os fatores: aspecto, declividade, elevação, geologia, solo, volume de madeira, tipo de árvore, distância e ordem do curso d'água. O mapa final foi classificado em cinco classes de potencial. As estradas projetadas foram então avaliadas segundo o mapa de potencial.

Çalişkan et al. (2019) compararam 5 métodos diferentes de análise multicritério para definir o melhor traçado de uma estrada florestal, otimizada para a viabilidade econômica e ambiental, na província de Trabzon, na região central do Mar Negro, porção Oriental da Turquia. Foram utilizados os critérios: avalanche, distância de rios, áreas protegidas, recursos naturais, tipo de solos, geologia, cobertura do solo e declividade. Foi gerado um mapa de superfície de custos e as estradas otimizadas para os traçados de menor custo.

Drăgoi et al. (2015) avaliaram o traçado de três novas estradas florestais em um distrito florestal localizado ao longo do Vale Crasna, no Condado de Prahova, na Romênia. A avaliação levou em consideração três grupos de critérios: benefícios, custos e riscos. Os benefícios e custos foram divididos em dois grupos (privado e social), e ao todo foram utilizados 17 critérios. Cada estrada foi avaliada segundo os 17 critérios e calculado o índice de custos, benefícios e riscos, através da soma da nota atribuída a cada critério.

Buğday e Özel (2019) para determinar as áreas mais adequadas para as estradas florestais na província de Çankırı no norte da Turquia, utilizaram as variáveis elevação, inclinação, litologia, espécies de árvores, índice de umidade topográfica (TWI), índice de potência de fluxo (SPI), curvatura do plano (Kc) e curvatura do perfil (Kp). Foram testados 16 modelos de lógica Fuzzy e AHP-M, e validados segundo a metodologia ROC/AUC. O modelo utilizando AHP-M e cinco fatores foi o que apresentou o melhor resultado.

Américo (2018) utilizou análise multicritério para gerar o mapa de áreas críticas a locação de estradas em uma fazenda de produção de madeira no município de Bofete, no estado de São Paulo. Os parâmetros utilizados foram: declividade, erodibilidade (K), distância de fluxo acumulado de água e orientação de vertentes. O parâmetro de maior influência foi à distância de fluxo acumulado, seguido de erodibilidade, orientação de vertentes e declividade. O mapa de áreas críticas foi reclassificado em sete níveis de criticidade, e as estradas foram então classificadas. A validação foi realizada utilizando ROC/AUC, com uma acurácia de 93,1%, indicando um resultado estatisticamente significativo.

Hosseini et al. (2019) em estudo realizado na província de Mazandaran no Irã, avaliaram a estrada existente e a estrada projetada, considerando fatores ecológicos, geomorfológicos, socioeconômicos e ecoturísticos para gerar o mapa de adequação a passagem de estradas. Os dados de adequação a passagem de estradas foram reclassificados em 5 classes.

Buğday e Akay (2019) realizaram o mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos na província de Kastamonu no noroeste da Turquia utilizando os fatores: elevação, declividade, aspecto, litologia, distância até falhas, distância até riachos, distância até estradas, TWI e SPI. Foram testados 12 modelos e o modelo que apresentou melhor desempenho foi o de regressão



logística com 7 fatores. O modelo M-AHP com o melhor desempenho utilizou os fatores: elevação, declividade, litologia, distância até falhas, distância até riachos, distância até estradas e SPI. A validação foi realizada utilizando dados de deslizamento anteriores e ROC/AUC.

Chiteculo et al. (2022) para melhorar a logística de atividades florestais na província de Huambo na Angola, elaboraram um mapa de aptidão a construção de estradas utilizando as variáveis geologia, declividade, distância das estradas as ferrovias, tipos de solos, elevação, fluxo acumulado e aspecto. A partir do mapa elaborado realizaram a classificação das estradas existentes e propuseram novas rotas otimizadas.

Oliveira (2023) elaborou um mapa de criticidade para diagnosticar e adequar as estradas florestais no município de Apiaí no estado de São Paulo, utilizando os critérios: uso do solo, temperatura, hipsometria, declividade, orientação das vertentes, distância ao fluxo de água acumulado e erodibilidade (K). A área foi classificada em 4 classes de criticidade.

Dražić et al. (2023) obtiveram um mapa de aptidão do terreno para avaliar a densidade ideal de estradas florestais na República Servia utilizando as variáveis morfométricas do terreno: declividade, aspecto, hipsometria, hidrografia, sinuosidade, Índice de Rugosidade do Terreno (TRI) e Índice de Posição Topográfica (TPI). A declividade foi considerada o parâmetro mais importante.

Kolkos et al. (2023) realizaram uma análise de impacto ambiental de estradas florestais no complexo florestal de Taxiarchis na Grécia. Eles avaliaram a intensidade de impacto das estradas florestais no ambiente natural e a capacidade do ambiente natural absorver estes impactos. Foram utilizados critérios florestais, topográficos e sociais.

Martins et al. (2014) para identificar as áreas adequadas para alocação de caixas para captação de água pluviais e sedimentos em estradas não pavimentadas na bacia hidrográfica do córrego Pureza no município de Itabira no estado de Minas Gerais, utilizaram os critérios distância da estrada, distância dos pontos de intersecção entre as estradas e cursos d'água, combinação entre classes de solo e uso do solo e declive.

Gumus (2017) avaliou as diferenças de percepções dos especialistas turcos ao priorizarem os fatores de avaliação de estradas florestais (técnicos, ambientais, sociais e econômicos). O estudo demonstrou a priorização dos fatores ambientais e técnicos como os mais importantes, seguidos pelos sociais e econômicos. Dentre os subfatores, o de maior importância foi a declividade longitudinal. Observou-se uma maior preocupação dos grupos de profissionais com os fatores ambientais do que o grupo de discentes, que deram maior prioridade aos fatores técnicos.

Coulter et al. (2006) apresentaram uma abordagem alternativa para definir prioridades de manutenção em estradas de baixo volume por meio de análise multicritério no oeste do estado do Oregon. A combinação de heurística, análise de custo-benefício, impactos ambientais e julgamento de especialistas produziram um cronograma de gerenciamento de estradas que se ajusta melhor ao paradigma atual de gerenciamento de estradas (não considerando apenas aspectos técnicos e econômicos).

Shiba (1995) analisou a estrutura dos benefícios dos sistemas de rede de estradas nas áreas rurais montanhosas do Japão. Os benefícios foram classificados em três principais fatores:



promover a produção florestal sustentável a longo prazo ou proteção de recursos, melhorar a infraestrutura geral de produção de madeira, melhorar a infraestrutura de assentamento em áreas rurais. Os critérios foram priorizados por três grupos diferentes. De acordo com ele, o AHP é útil para resolver conflitos políticos, econômicos e ambientais, pois pode lidar com critérios intangíveis de forma padrão, tais como objetos, sentimentos, poder, valores sociais, impactos ambientais e outras ideias comuns em nossa sociedade para as quais não temos outros meios estabelecidos de avaliação.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A microbacia hidrográfica Valão da Jabuticaba está localizada no município de Itaperuna, pertencente a região Noroeste do Estado do Rio de Janeiro, entre os paralelos 21°14' e 21°07' S e 41°54' e 41°47' W. Possui uma área de 4159 hectares ocupada predominantemente por pastagens. O clima do município de Itaperuna é classificado como Aw, de acordo com a classificação de Köppen, com características típicas de clima tropical chuvoso com inverno seco, sendo que no trimestre menos chuvoso, as médias pluviométricas são inferiores a 60 mm. A temperatura média anual é de 24°C e a precipitação média anual é de 1.200 mm (Martorano et al., 2003). Na **Figura 1** é apresentado o mapa de localização da MBH Valão da Jabuticaba.

A malha viária da microbacia hidrográfica possui 27,17 km de estradas, destas, 18,24 km são estradas de terra. O restante, 8,93 km, são estradas revestidas com asfalto, conforme pode ser observado no mapa das estradas da microbacia (**Figura 2**).

As altitudes da microbacia variam de 101 a 593 metros, sendo na porção sul as altitudes mais baixas (**Figura 3**).

As classes predominantes de relevo são o Plano e o Forte Ondulado. Destacando-se a representação de todas as classes de relevo na microbacia, sendo ao sul relevo mais plano e ao norte relevo mais movimentado (**Figura 4**).

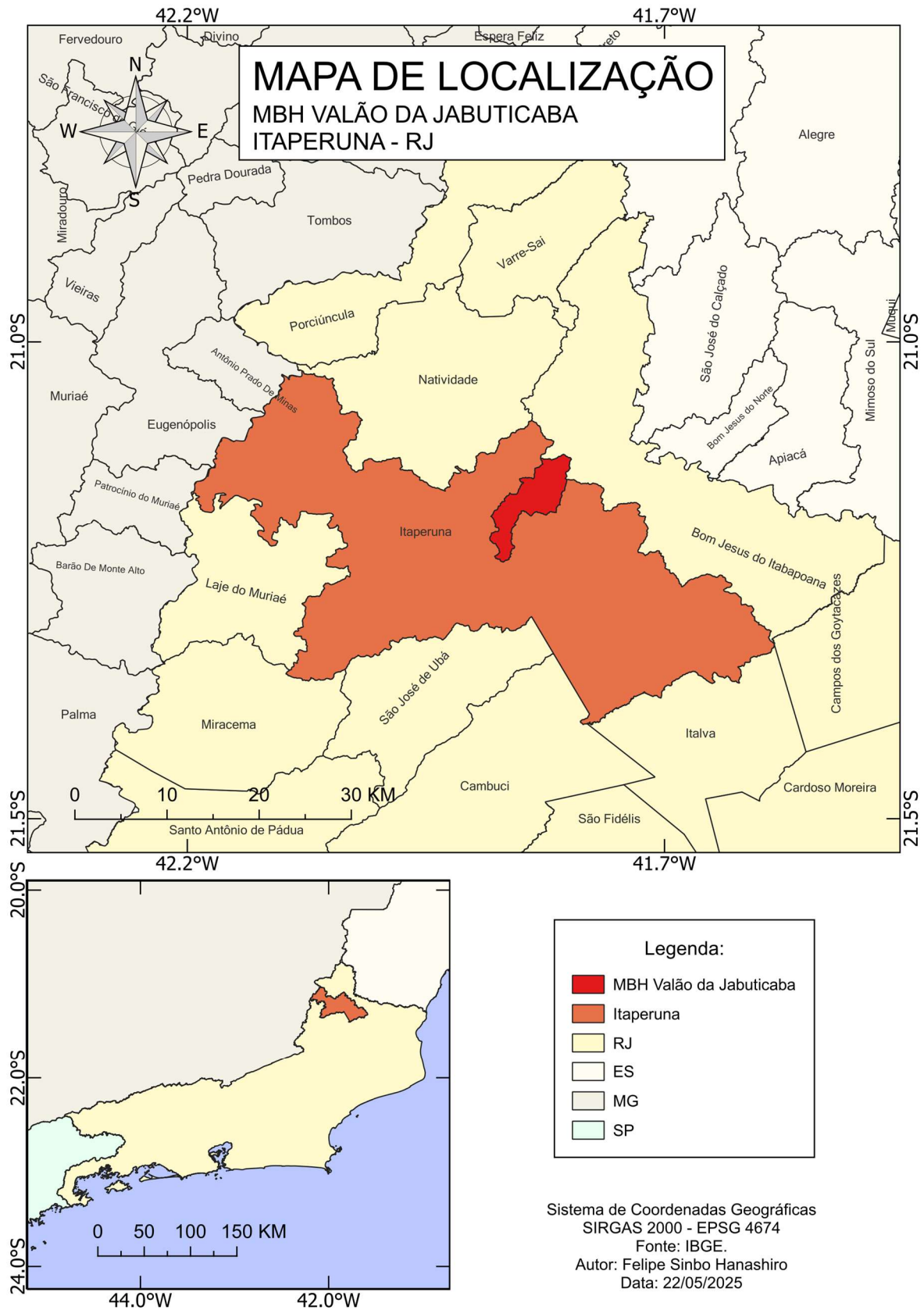


Figura 1- Mapa de localização da microbacia hidrográfica Valão da Jabuticaba.

Fonte: Próprio autor.

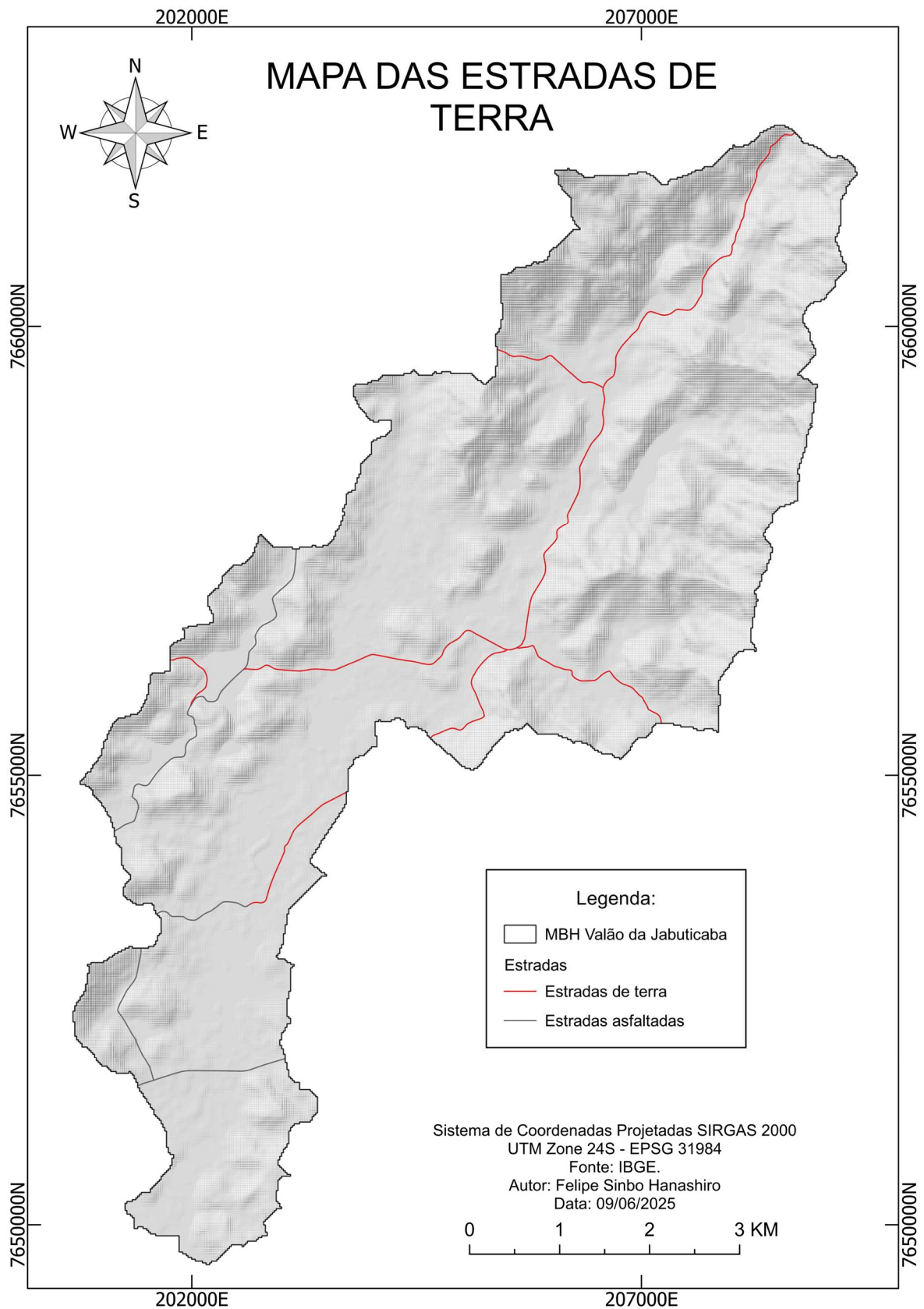


Figura 2- Mapa das estradas da MBH Valão da Jabuticaba.

Fonte: Próprio autor.

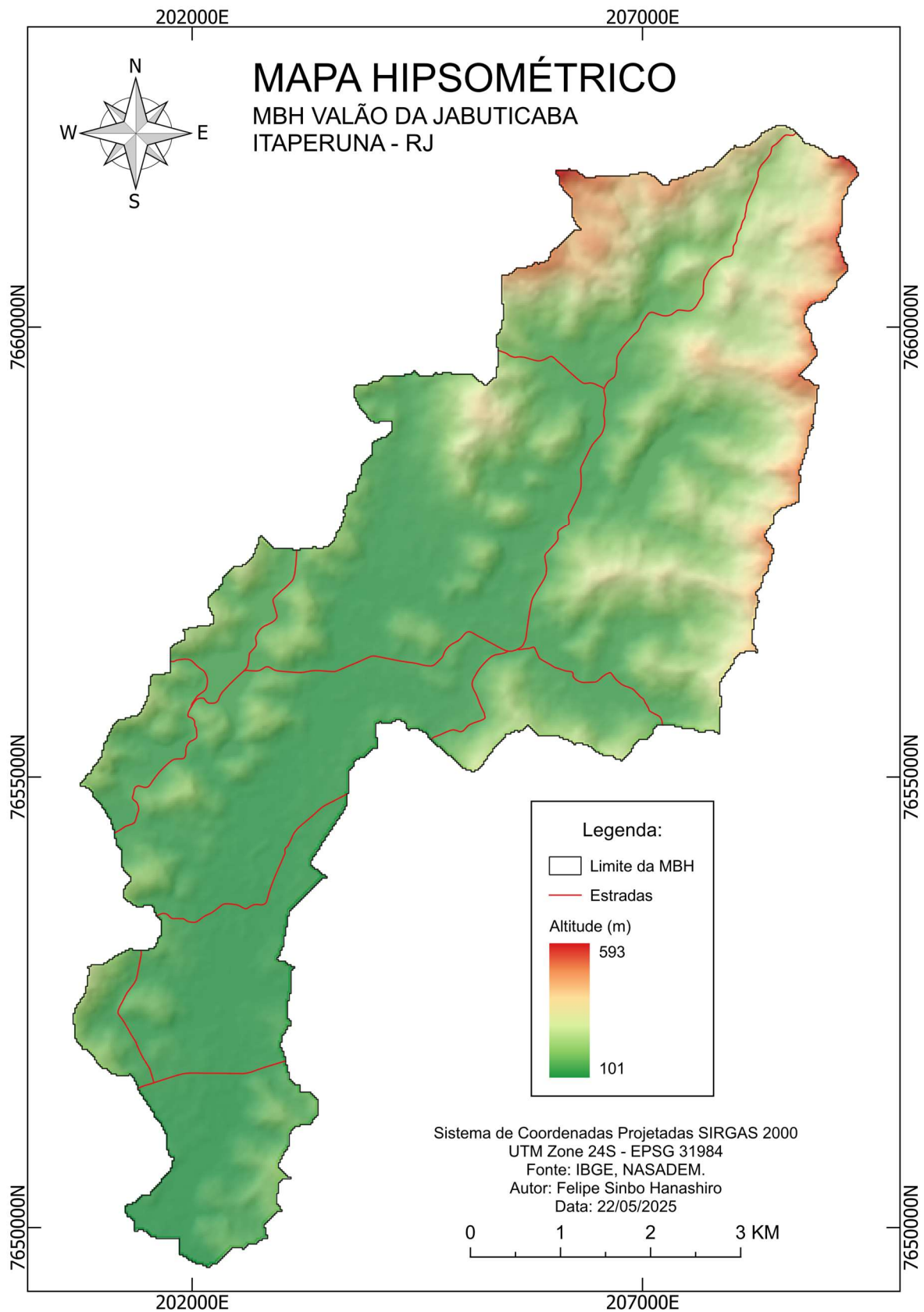


Figura 3- Mapa hipsométrico da MBH Valão da Jabuticaba.

Fonte: Próprio autor.

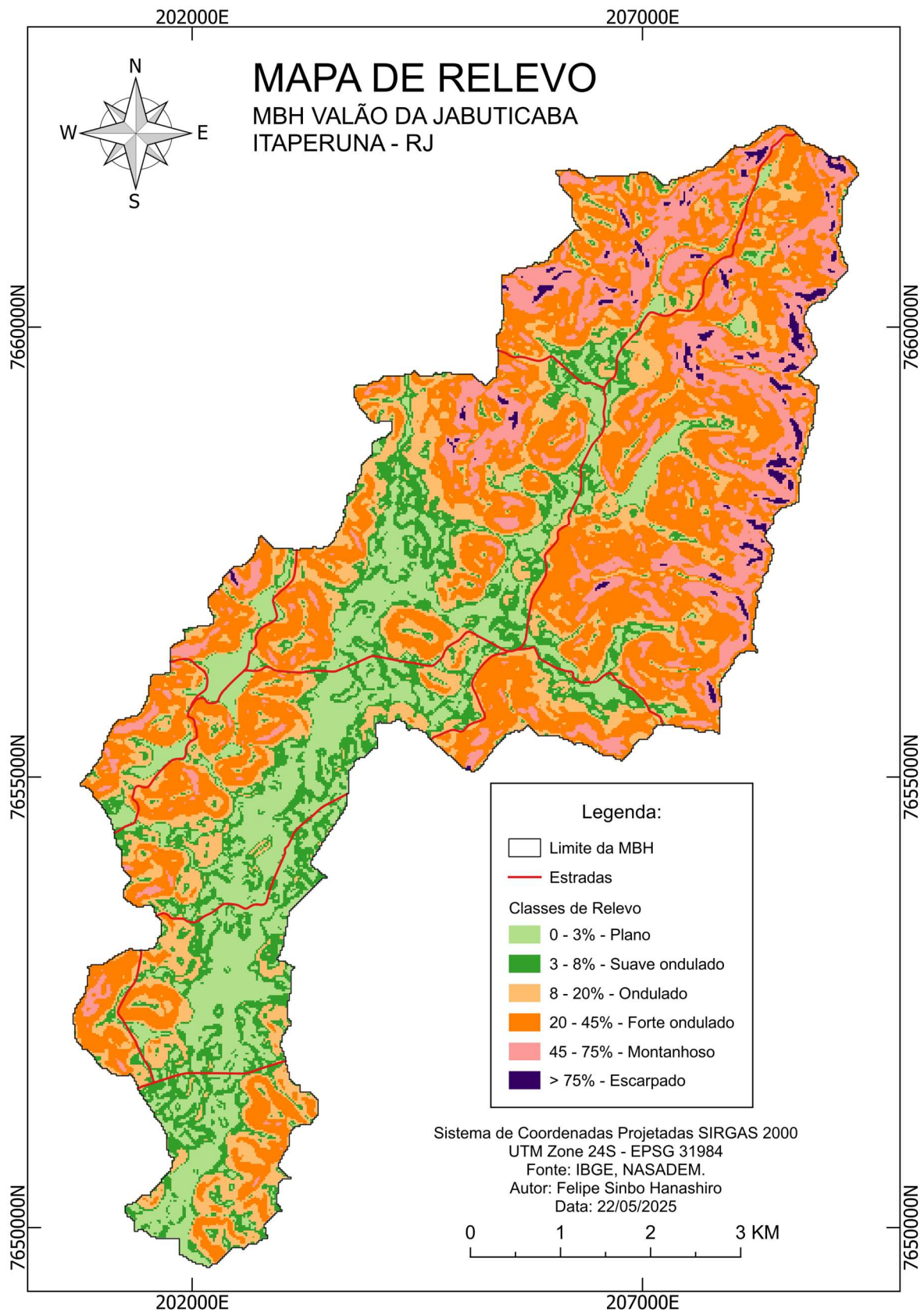


Figura 4- Mapa de classificação do relevo da MBH Valão da Jabuticaba.

Fonte: Próprio autor.

3.2 Caracterização das variáveis ambientais

3.2.1 Mapa de solos.

O mapa de solos foi elaborado a partir dos dados pedológicos do IBGE e o geoprocessamento realizado através do software QGIS. Os dados foram recortados para a área de estudo e depois reprojitados para o sistema de projeção UTM zona 24S e Datum Sirgas 2000. Em seguida foi realizado o recorte para a microbacia. Adotou-se a classe principal da unidade de mapeamento até o quarto nível categórico de classificação do SIBCs (**Figura 5**).

3.2.2 Mapa de erodibilidade (K)

O fator erodibilidade do solo (K) foi calculado utilizando o método indireto de Bouyoucos (1935) apud Bandeira e Teixeira (2020) que considera a textura do solo como fator principal e utiliza a seguinte equação para o cálculo da erodibilidade:

$$K = \left(\frac{\% \text{areia} + \% \text{silte}}{\% \text{argila}} \right) / 100$$

Onde:

K = fator de erodibilidade do solo em $M.g.ha.h.ha^{-1}.MJ^{-1}.mm^{-1}$;

% areia = fração areia em porcentagem;

% silte = fração silte em porcentagem;

% argila = fração argila em porcentagem.

Os valores de erodibilidade obtidos foram classificados segundo as classes de erodibilidade de Mannigel et al. (2002) apud Bandeira e Teixeira (2020).

Os teores de argila, areia e silte foram extraídos da Coleção 2 do MapBiomias Solo (versão beta), expressos em porcentagem na profundidade de 0 a 30 cm. Com resolução espacial de 30 m, esses dados foram elaborados a partir de amostras de solo disponíveis no Repositório Brasileiro de Dados de Solo (SoilData), em combinação com dezenas de covariáveis ambientais que refletem os fatores de formação e transformação do solo brasileiro.

O download dos dados foi realizado com a utilização da plataforma Google Earth Engine. Obteve-se os mapas de argila, areia e silte para a área de interesse. No QGIS, os mapas foram reprojitados para o sistema de projeção UTM 24 S Datum Sirgas 2000, e em seguida recortados para a área da MBH Valão da Jabuticaba. Utilizou-se a calculadora raster para calcular a erodibilidade (K). Os valores de erodibilidade foram então classificados (**Figura 6**).

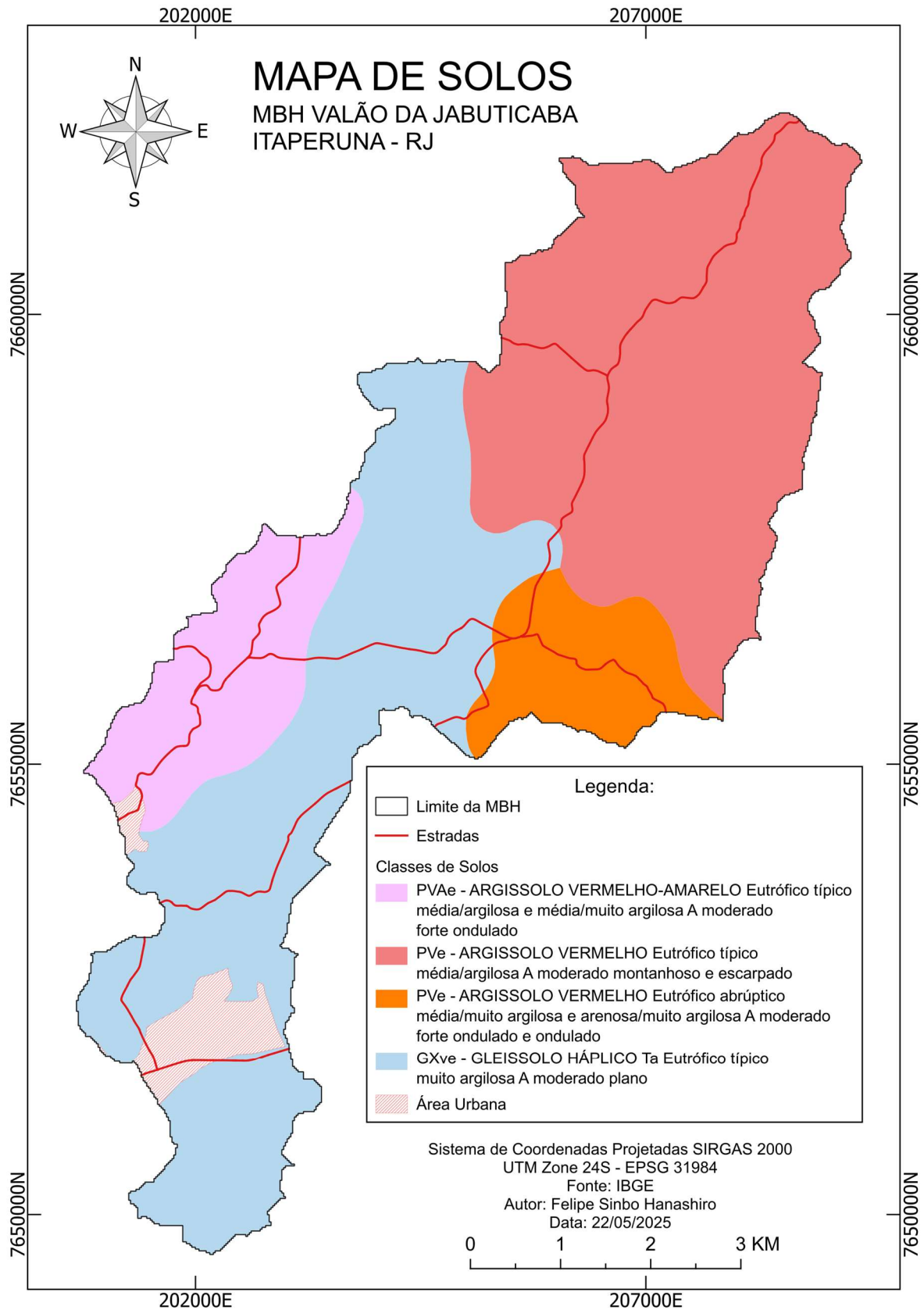


Figura 5- Mapa de solos da MBH Valão da Jabuticaba.

Fonte: Próprio autor.

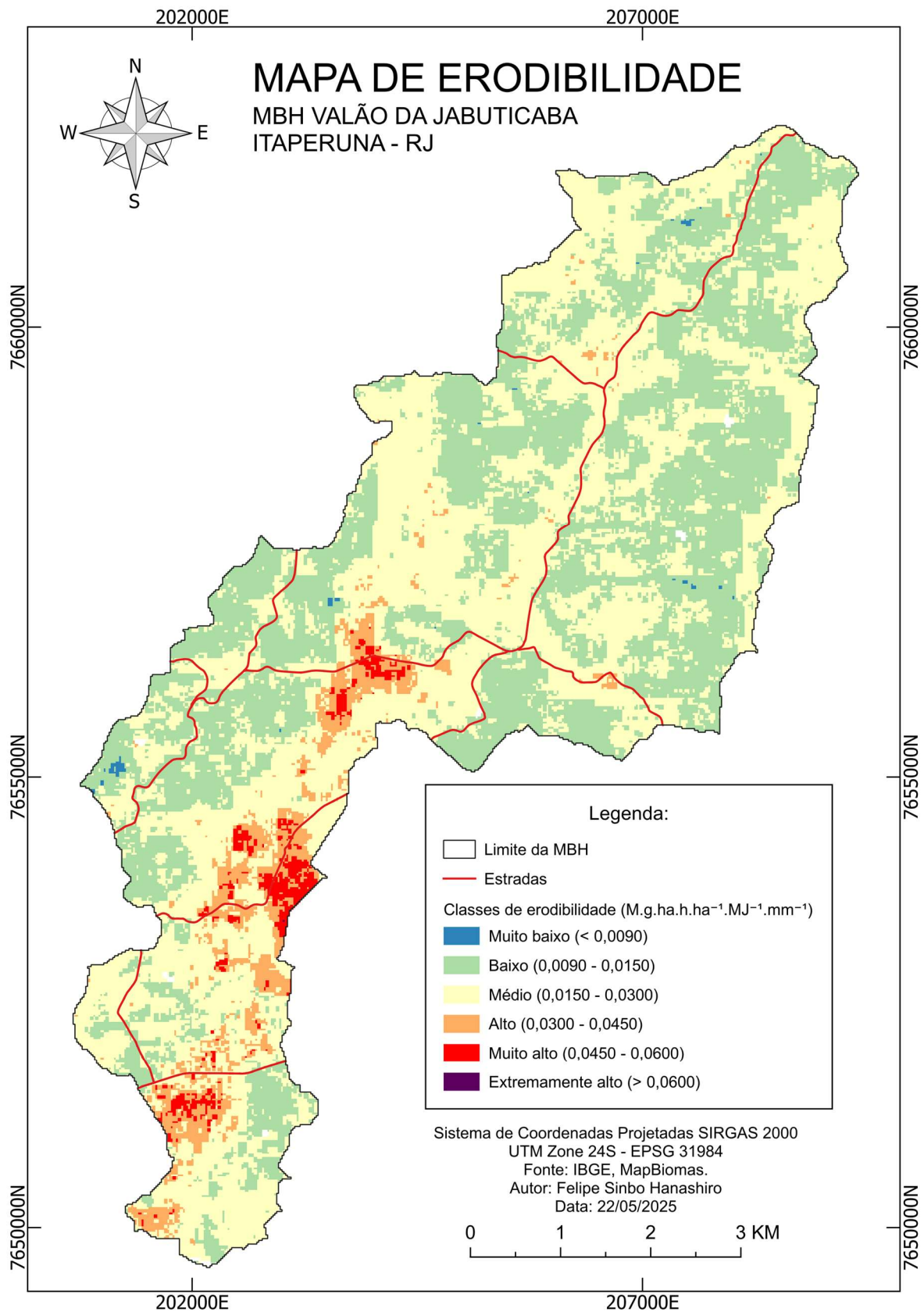


Figura 6- Mapa de classes de erodibilidade (K) da MBH Valão da Jabuticaba.

Fonte: Próprio autor.



3.2.3 Mapa geológico

O mapa geológico foi elaborado a partir dos dados correspondente à Folha Itaperuna (SF-24-V-C-I), escala 1:100.000 do CPRM (DUARTE et al., 2012). Os dados foram reprojitados para o sistema de projeção UTM 24 S Datum Sirgas 2000 e recortados para a área da MBH do Valeão da Jabuticaba (**Figura 7**).

A unidade NPasn corresponde ao grupo Andrelândia constituído por granada-biotita gnaisse bandado com intercalações de sillimanita-granada-biotita gnaisse, sillimanita-feldspato quartzito, com variações para quartzitos grossos feldspáticos (q1), e bandas ou lentes de anfíbolito e rochas calcissilicáticas (DUARTE et al., 2012).

A unidade PP2jfgl corresponde ao Complexo Juiz de Fora composto por ortogranulitos de composição variada, incluindo rochas charnockíticas, charno-enderbíticas, enderbíticas e rochas gabróicas. A estrutura varia desde maciça (granoblástica) a gnáissica ou milonítica (DUARTE et al., 2012).

A unidade Qca corresponde a Depósito Colúvio-Aluvionar constituído por depósitos aluvionares recentes (areias com intercalações de argila, cascalho e restos de matéria orgânica) (DUARTE et al., 2012).

3.2.4 Mapa de uso e cobertura do solo.

O mapa de uso e cobertura do solo foi elaborado a partir de imagens nível 2 do satélite Landsat 9, utilizou-se as bandas de 1 a 7 e a classificação supervisionada utilizando o método Random Forest. As imagens foram adquiridas da plataforma Earth Explorer da USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). O geoprocessamento foi realizado no software QGIS e a conversão dos valores em pixel para reflectância foi realizada no plugin Semi-Automatic Classification – SCP. Após a conversão, as bandas foram empilhadas e reprojitadas para o sistema de projeção UTM 24 S Sirgas 2000. Em seguida foi realizado o recorte para a área da microbacia hidrográfica. Finalizado o pré-processamento, realizou-se a classificação supervisionada utilizando o plugin Dzetsaka. A imagem foi classificada em 7 classes de uso e cobertura do solo (**Figura 8**).

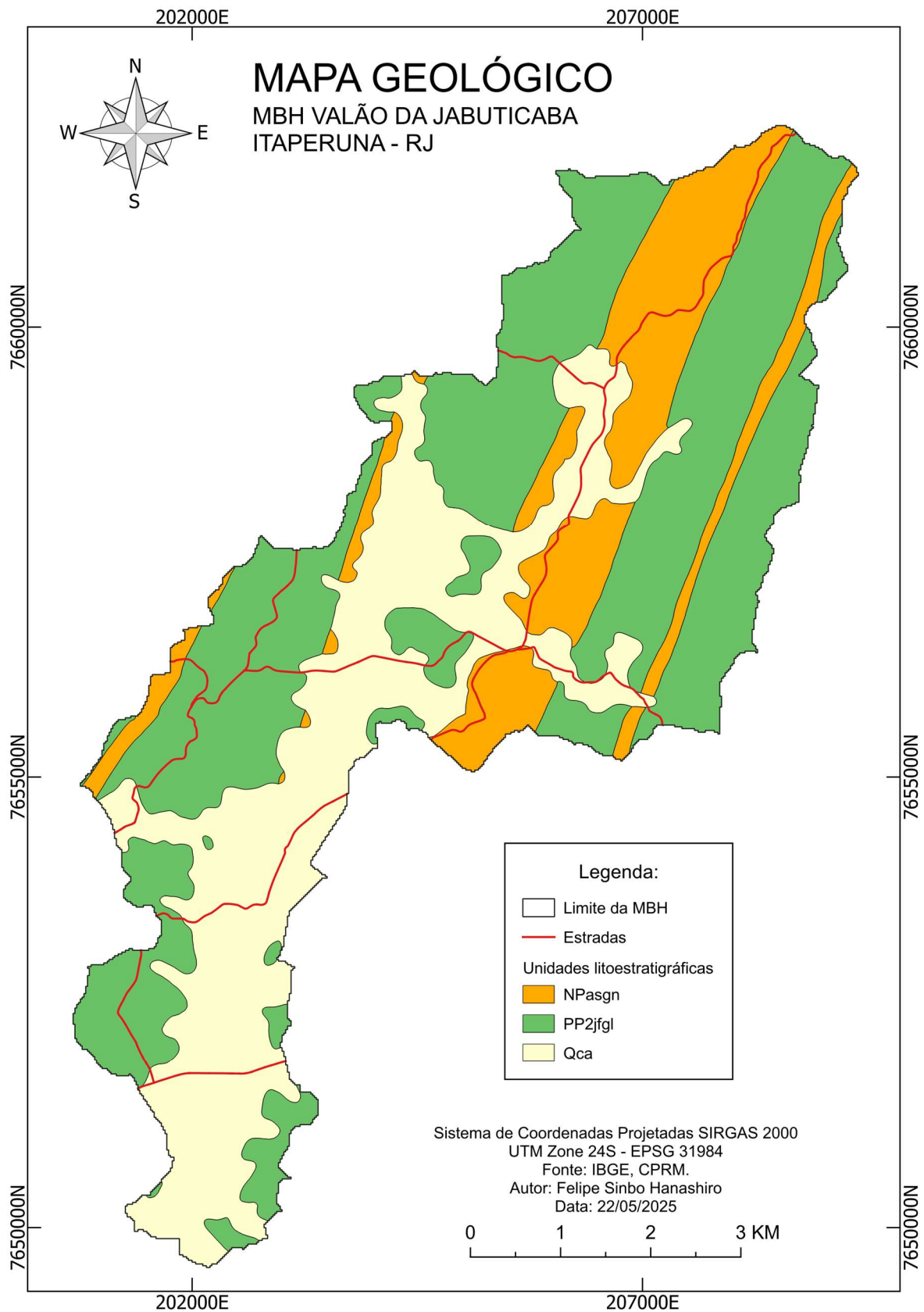


Figura 7- Mapa geológico da MBH Valão da Jabuticaba.

Fonte: Próprio autor.

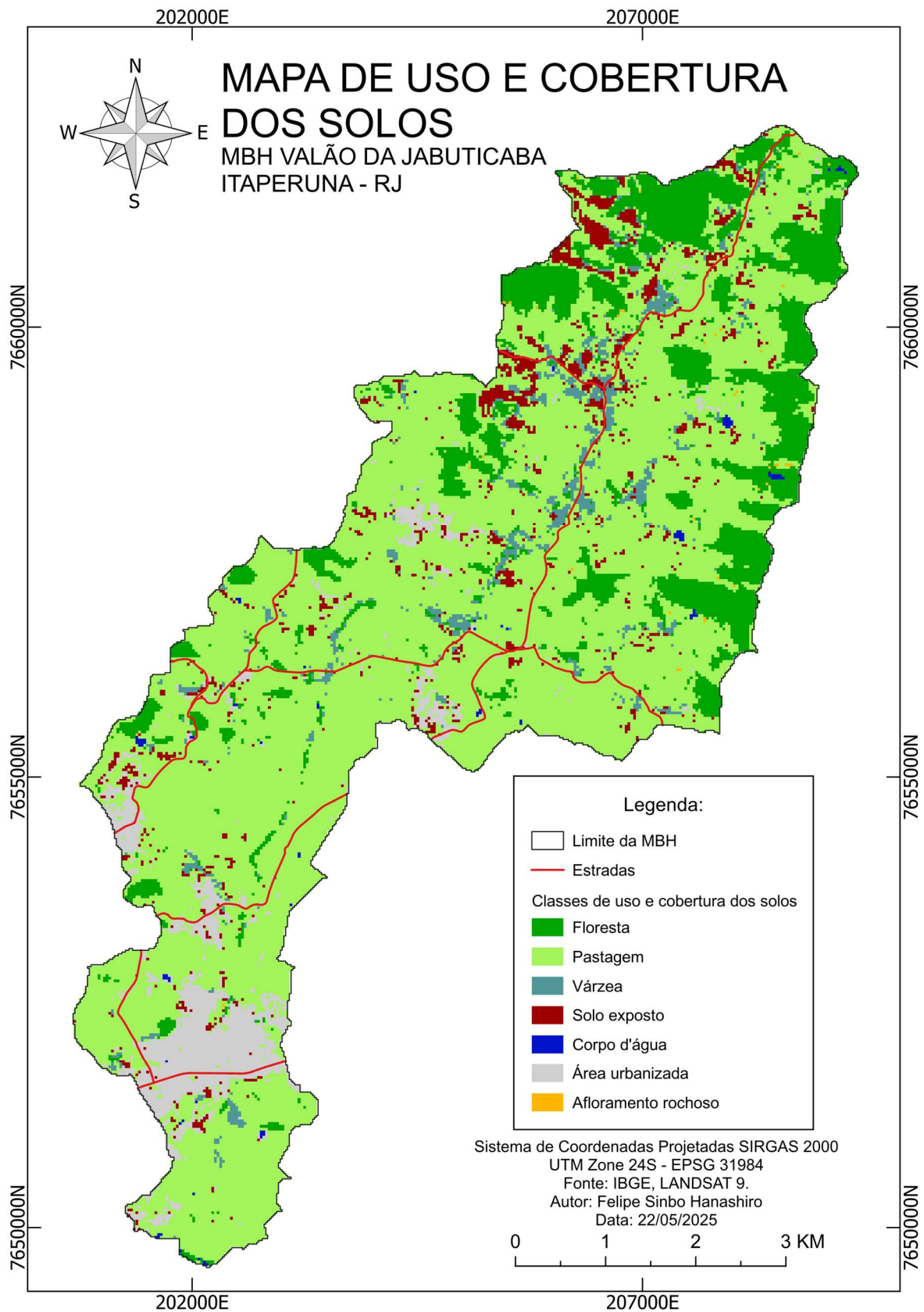


Figura 8- Mapa de uso e cobertura do solo da MBH Valão da Jabuticaba.

Fonte: Próprio autor.

3.2.5 Modelo digital de elevação e extração das covariáveis ambientais.

O modelo digital de elevação utilizado neste trabalho foi o MDE NASADEM, obtido através da plataforma OpenTopography (<https://opentopography.org>), acessado pelo plugin OpenTopography DEM.

O MDE foi reprojetoado para o sistema de projeção UTM 24 S Sirgas 2000 e o geoprocessamento realizado através do complemento SAGA GIS do QGIS. As depressões espúrias foram identificadas e filtradas utilizando a ferramenta Fill Sink (Wang & Liu), obtendo-se o modelo digital de elevação hidrologicamente consistente. Em seguida foi realizado o recorte do MDE para a MBH Valão da Jabuticaba, este serviu de entrada para a extração das cováriaveis.

3.2.5.1 Mapa de declividade.

A declividade e o aspecto foram calculadas através da ferramenta Slope, aspect, curvature do SAGA GIS, utilizando o método de 9 parâmetros e polinômio de 2^a ordem (Zevenbergen & Thorne 1987). A declividade foi calculada em porcentagem (**Figura 9**).

3.2.5.2 Mapa de aspecto.

O mapa de aspecto foi calculado junto com a declividade utilizando a ferramenta Slope, aspect, curvature do SAGA GIS. O aspecto foi calculado em graus e classificado conforme as orientações cardinais (**Figura 10**).

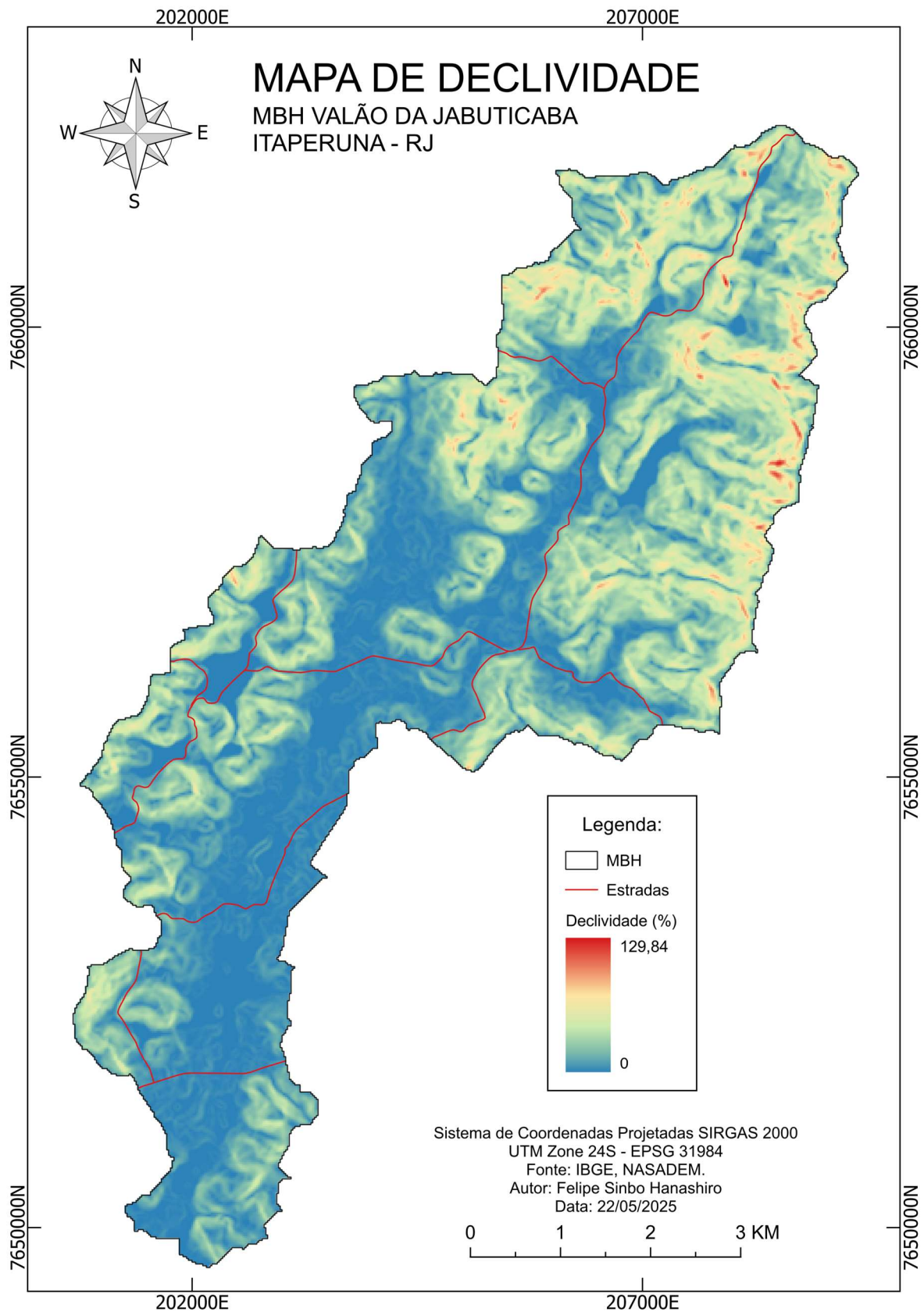


Figura 9- Mapa de declividade da MBH Valão da Jabuticaba.

Fonte: Próprio autor.

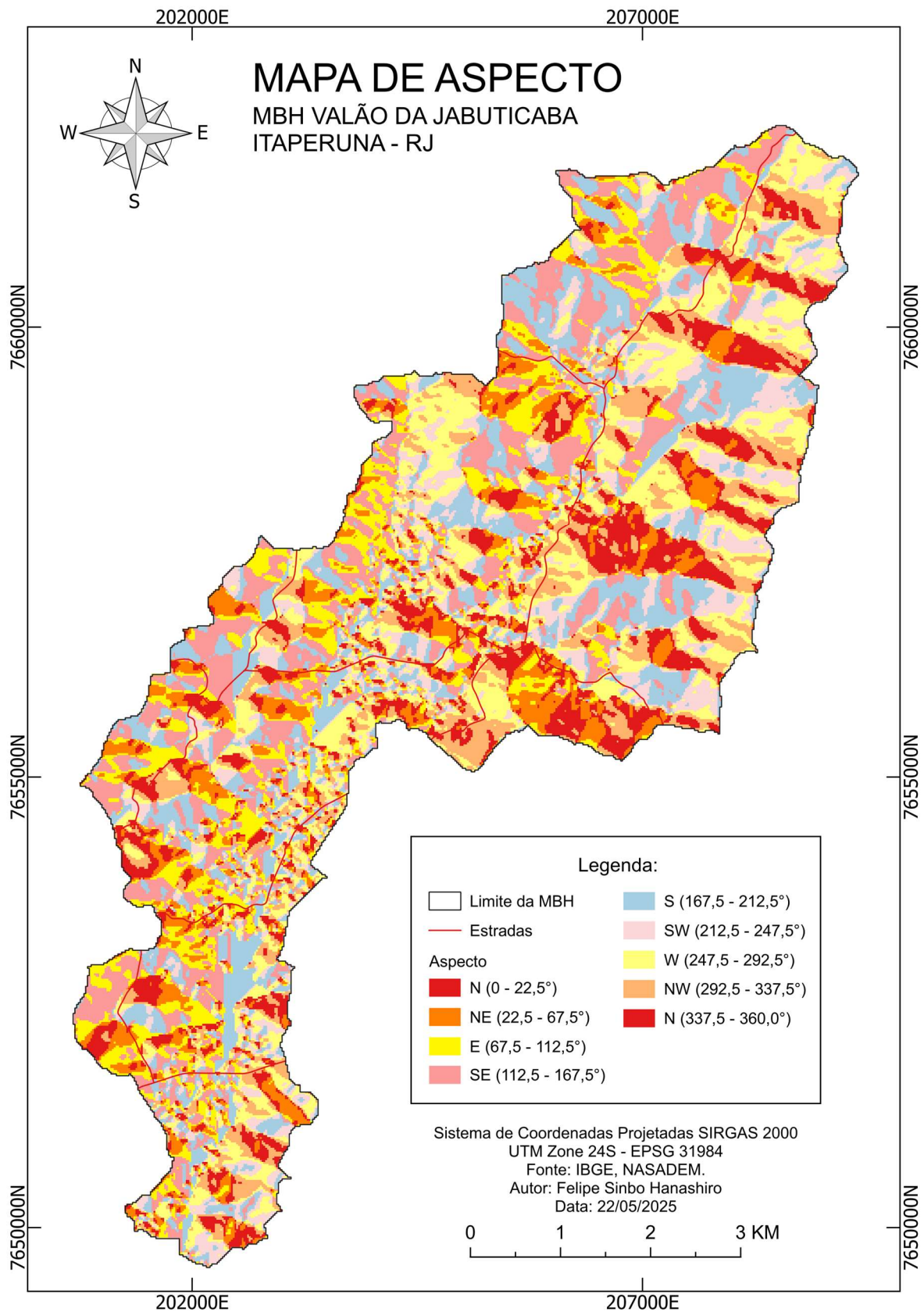


Figura 10- Mapa de aspecto da MBH Valão da Jabuticaba.

Fonte: Próprio autor.

3.2.5.3 Mapa de curvatura.

Os planos de curvatura e perfis de curvatura foram classificados utilizando a ferramenta Curvature classification do SAGA GIS (**Figura 12**). A classificação foi realizada conforme Dikau (1989) apud Faria (2016) (**Figura 11**).

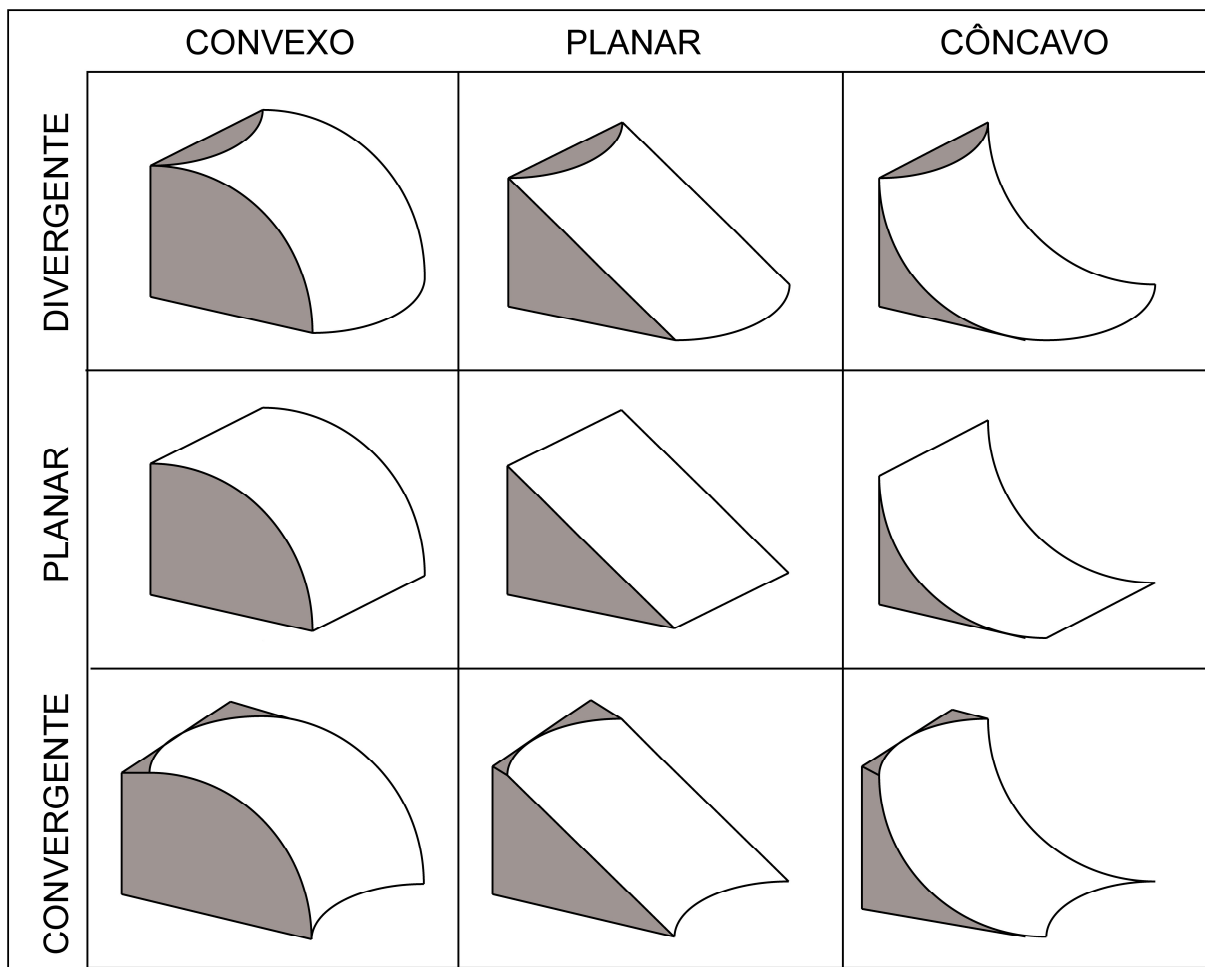


Figura 11- Classificação das formas do terreno conforme os planos de curvatura e perfis de curvatura.

Fonte: Próprio autor.

3.2.5.4 Mapa de índice de posição topográfico (TPI).

O índice de posição topográfico (TPI) foi calculado utilizando a ferramenta Topographic position index (tpi) do SAGA GIS (**Figura 13**).

3.2.5.5 Mapa de índice de umidade topográfico (TWI).

O índice de umidade topográfico (TWI) foi calculado utilizando a ferramenta Topographic wetness index (twi) do SAGA GIS (**Figura 14**).

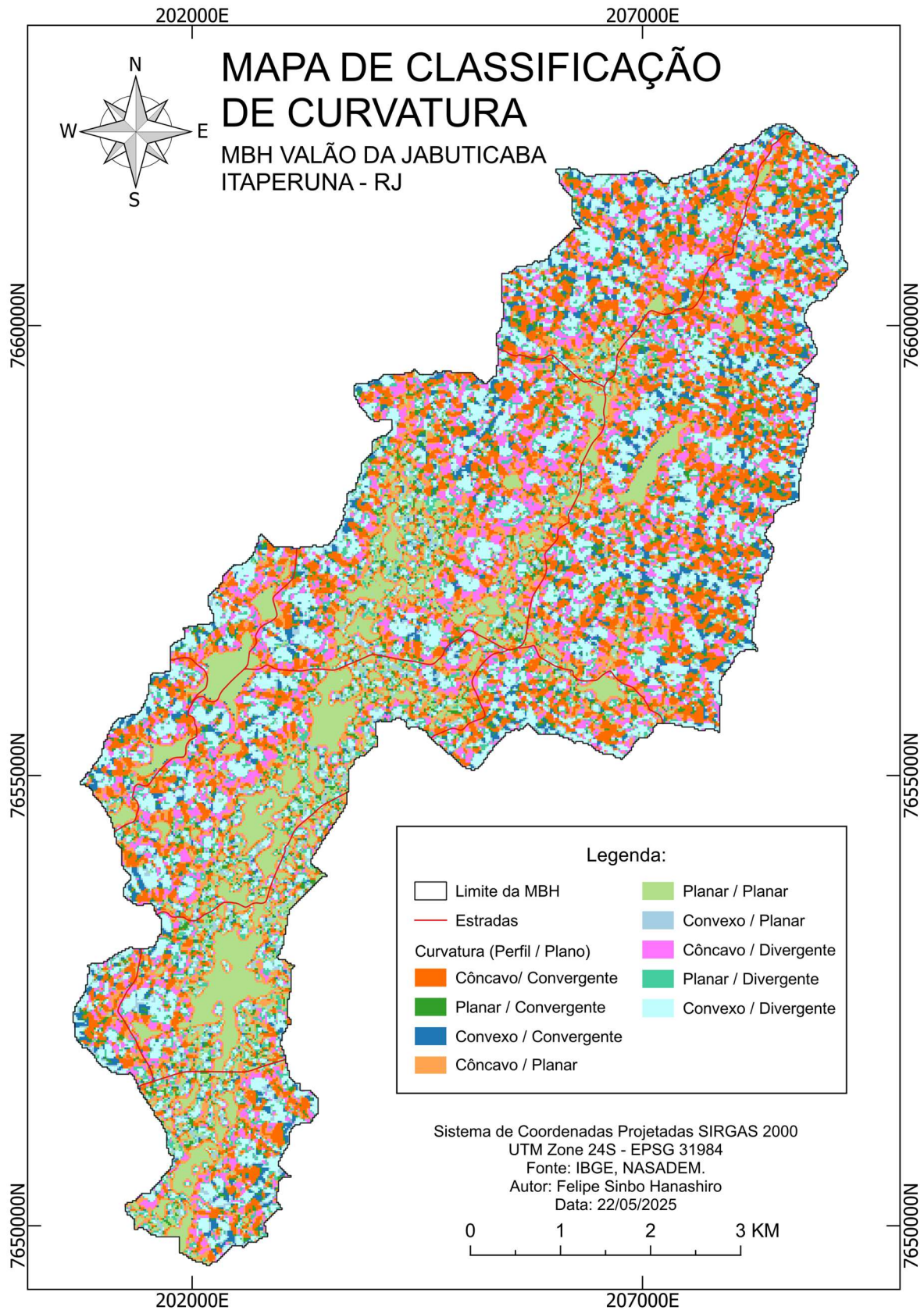


Figura 12- Mapa de classificação de curvatura.

Fonte: Próprio autor.

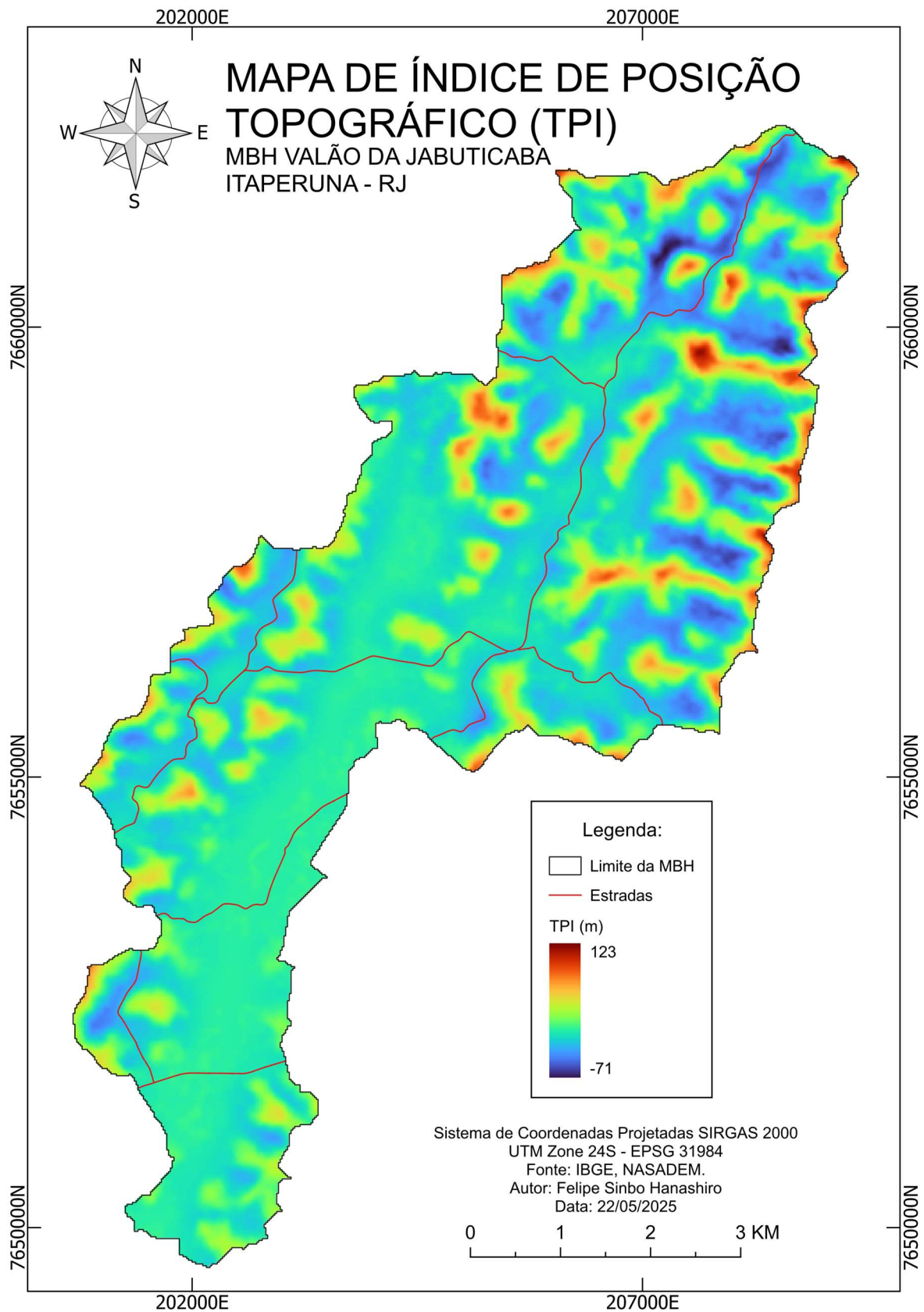


Figura 13- Mapa de índice de posição topográfico (TPI).

Fonte: Próprio autor.

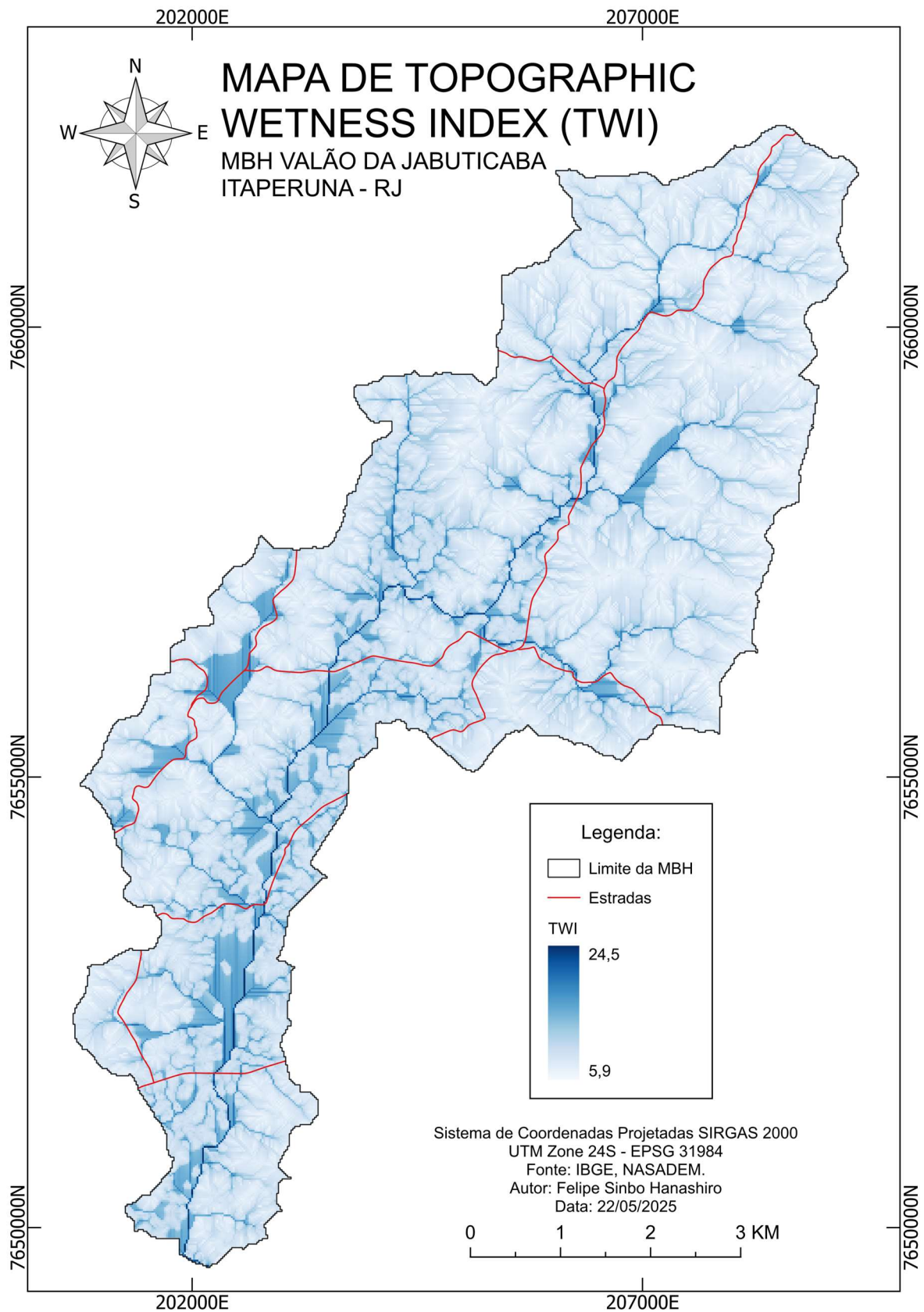


Figura 14- Mapa de índice de umidade topográfico (TWI).

Fonte: Próprio autor.



3.3 Mapeamento da suscetibilidade a defeitos.

3.3.1 Normalização das variáveis.

A normalização das variáveis foi efetuada no QGIS, utilizando uma escala padronizada que varia de 1 a 5. A reclassificação foi realizada utilizando a ferramenta Reclassificar por tabela nativa do QGIS. Durante esse procedimento, as localidades identificadas como mais suscetíveis a defeitos, com base nos critérios analisados, foram associadas aos valores mais altos na escala, ou seja, 5. Essa abordagem permite destacar e atribuir maior importância ou suscetibilidade às áreas consideradas mais relevantes em relação aos critérios específicos em avaliação.

Após a normalização, as variáveis foram reclassificadas em 5 classes de suscetibilidade a defeitos: baixo, muito baixo, moderado, alto e muito alto.

3.3.2 Priorização e ponderação das variáveis.

A atribuição de peso ponderado é fundamental para indicar a importância das variáveis no mapeamento. A fim de obter esse conjunto de pesos, as variáveis foram classificadas com base em sua importância relativa para o mapeamento. Para realizar essa classificação, foi aplicada a lógica de Comparação Pareada, por meio do método AHP. Neste método, os diferentes critérios que influenciam a tomada de decisão são comparados dois a dois, e um valor de julgamento é atribuído à relação entre eles, utilizando uma escala pré-definida, conforme Quadro 1 (Saaty, 1994). A definição dos valores de importância entre os critérios é utilizada como entrada na matriz de comparação pareada, a partir da qual os pesos ponderados dos fatores são calculados (Saaty, 1994). Para realizar a hierarquização e ponderação das variáveis, foram realizadas consultas à literatura e conhecimento especialista para embasar as decisões tomadas.

Com a matriz de comparação pareada definida, realizou-se a normalização da matriz. O peso ponderado de cada variável foi obtido pela média aritmética dos pesos normalizados.



Quadro 1 - Escala absoluta, definição e justificativa para comparação pareada no método AHP.

Intensidade de importância	Definição	Justificativa
1	Igual importância	As duas opções atividades contribuem equitativamente para o objetivo
3	Importância moderada de um fator sobre o outro	Julgamento e experiência favorecendo fortemente uma atividade sobre a outra
5	Essencial ou forte importância	Julgamento e experiência favorecendo fortemente uma atividade sobre a outra
7	Importância muito forte	Uma atividade é fortemente favorecida e sua dominância é demonstrada na prática
9	Importância extrema	Evidência favorecendo uma atividade sobre a outra é a mais expressiva possível na ordem de afirmação
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre os julgamentos adjacentes	Quando há necessidade de compromisso

Fonte: Adaptado de Saaty (1994).

3.3.3 Verificação da consistência

Após a obtenção dos pesos, foi calculado a Razão de Consistência (CR), esse valor de acordo com Saaty (1994) indica a probabilidade de que as classificações foram atribuídas aleatoriamente, e valores inferiores a 0,10 indicam boa consistência.

3.3.4 Agregação das variáveis

A partir dos pesos ponderados, efetuou-se a Combinação Linear Ponderada (CLP), somando-se as variáveis normalizadas multiplicadas pelos seus respectivos pesos ponderados. Para realizar esta operação utilizou-se a Calculadora Raster.

O mapa obtido foi reclassificado de acordo com a escala de 1 a 5, em: Muito baixo, Baixo, Moderado, Alto e Muito alto, correspondentes ao grau de suscetibilidade a defeitos das estradas de terra.

3.4 Identificação dos trechos críticos em estradas de terra

Por fim, realizou-se a identificação dos trechos críticos em estradas de terra sobrepondo-se a camada de estradas sobre o mapa de suscetibilidade a defeitos em estradas de terra.

Para a atribuição dos valores de suscetibilidade a defeitos a camada de estradas utilizou-se a ferramenta Add raster values to features do SAGA GIS.



3.5 Avaliação das estradas em campo

As estradas foram percorridas e avaliadas a cada 500 m. Os pontos avaliados foram fotografados e georreferenciados. Após o levantamento de campo, os pontos foram classificados conforme a metodologia GPM adaptada. A Tabela 1 demonstra as classes e os critérios utilizados.

Tabela 1- Tabela de classificação de estradas de terra conforme metodologia adaptada GPM.

Classe	Coefficiente	Descrição
Excelente	1	Abaulamento, drenagem e revestimentos excelentes. Nenhuma manutenção necessária. Nenhum defeito aparente.
Bom	2	Abaulamento, drenagem e revestimentos adequados. Somente limpeza dos dispositivos de drenagem.
Regular	3	Abaulamento moderado, presença de dispositivos de drenagem, algum revestimento. Poucos sulcos e buracos. Necessidade de manutenção do abaulamento e dispositivos de drenagem, recomposição do revestimento.
Ruim	4	Pouco ou nenhum abaulamento, com dispositivos de drenagem até 50% adequados. Erosão em sucos moderada, buracos moderados, camada de revestimento deficiente.
Muito ruim	5	Nenhum abaulamento ou estrada encaixada com grandes poças. Pouca ou nenhum dispositivo de drenagem. Erosão em sulcos severa, buracos severos, pouco ou nenhum revestimento.

Fonte: Próprio autor.

3.6 Validação da metodologia

As classes previstas das estradas de terra pelo AHP foram comparadas com a classificação levantada em campo. Realizou-se a análise ROC/AUC com a abordagem Um-vs-Todos. A análise foi realizada em Python utilizando a biblioteca scikit-learn.



4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados e analisados os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia de análise multicritério para a identificação de trechos críticos nas estradas de terra da MBH Valão da Jabuticaba. A discussão abrange a normalização das variáveis, a ponderação via método AHP, a geração dos mapas de suscetibilidade a defeitos em estradas de terra, a identificação dos trechos críticos em estradas de terra e a validação da metodologia com dados levantados em campo.

4.1 Ponderação e análise das variáveis ambientais

O primeiro passo para a modelagem foi a normalização das nove variáveis ambientais em uma escala padronizada de 1 (Muito baixo) a 5 (Muito alto). A atribuição desses valores foi baseada na influência de cada fator na ocorrência de defeitos em estradas de terra, conforme a literatura e o conhecimento especialista.

Na variável solos, a maior suscetibilidade (coeficiente 5) foi atribuída ao GLEISSOLO HÁPLICO (GX_{ve}), devido às suas características de drenagem deficiente, que favorece a formação de borrachudos e atoleiros. Em contrapartida o ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO (PVA_e) recebeu a menor suscetibilidade (coeficiente 1).

A variável erodibilidade (K) foi normalizada conforme as classes de erodibilidade, portanto maiores valores representam maior suscetibilidade a erosão.

A variável geologia foi avaliada pela maior resistência da rocha e sua relação com a capacidade de suporte.

Na variável uso e cobertura do solo as áreas de solo exposto e afloramento rochoso foram consideradas as mais suscetíveis (coeficiente 5), por facilitarem o escoamento superficial e a erosão. As áreas de floresta e várzea receberam coeficientes mais baixos.

Na análise da variável declividade, considerada um dos fatores mais críticos, as maiores declividades receberam os maiores coeficientes. Trechos com mais de 15% de inclinação foram classificados com suscetibilidade "Muito alto" (coeficiente 5), pois intensificam a velocidade do escoamento superficial da água, potencializando processos erosivos.

Na avaliação da variável aspecto, as faces de vertente voltadas para o sul (S) receberam a maior suscetibilidade (coeficiente 5), pois recebem menos radiação solar, o que contribui para a retenção de umidade no solo por mais tempo.

Já na análise da variável Índice de Posição Topográfico (TPI), os valores negativos, que representam os fundos de vale, foram associados a uma maior suscetibilidade (coeficiente 5 para $TPI < -20$), por serem áreas de acúmulo de água e possuírem drenagem deficiente. Os topos de morro (valores positivos) receberam os menores coeficientes.

Enfim, na análise da variável Índice de Umidade Topográfico (TWI), os valores elevados de TWI indicam maior propensão ao acúmulo de umidade no solo. Por isso, áreas com $TWI > 19$ receberam a classificação de suscetibilidade "Muito alto".

As tabelas de normalização e os mapas das variáveis ambientais normalizadas são apresentadas nas tabelas de 2 a 10 e nas figuras 15,16 e 17. Observa-se que as variáveis solos,



geologia e declividade apresentam grandes porções da microbacia classificadas como "Muito alto" a suscetibilidade a defeitos em estradas de terra.

Tabela 2- Coeficientes de normalização da variável solos.

Suscetibilidade a Defeitos	Coeficiente	Classe
Muito baixo	1	PVAe -ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico típico
Baixo	2	PVe – ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico típico
Moderado	3	PVe – ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico abruptico
Alto	4	Área urbana
Muito alto	5	GXve – GLEISSOLO HÁPLICOS Ta Eutrófico típico

Fonte: Próprio autor.

Tabela 3- Coeficientes de normalização da variável erodibilidade (K).

Suscetibilidade a Defeitos	Coeficiente	Classe
Muito baixo	1	< 0,0090
Baixo	2	0,0090 – 0,0150
Moderado	3	0,0150 – 0,0300
Alto	4	0,0300 – 0,0450
Muito alto	5	> 0,0450

Fonte: Próprio autor.

Tabela 4- Coeficientes de normalização da variável geologia.

Suscetibilidade a Defeitos	Coeficiente	Classe
Muito baixo	1	PP2jfgl
Baixo	2	
Moderado	3	NPasgn
Alto	4	
Muito alto	5	Qca

Fonte: Próprio autor.



Tabela 5- Coeficientes de normalização da variável uso e cobertura do solo.

Suscetibilidade a Defeitos	Coeficiente	Classe
Muito baixo	1	Corpo d'água, Várzea
Baixo	2	Floresta
Moderado	3	Pastagem
Alto	4	Área urbanizada
Muito alto	5	Solo exposto, Afloramento rochoso

Fonte: Próprio autor.

Tabela 6- Coeficientes de normalização da variável declividade.

Suscetibilidade a Defeitos	Coeficiente	Classe
Muito baixo	1	0 – 3%
Baixo	2	3 – 8%
Moderado	3	8 – 12%
Alto	4	12 – 15%
Muito alto	5	> 15%

Fonte: Próprio autor.

Tabela 7- Coeficientes de normalização da variável aspecto.

Suscetibilidade a Defeitos	Coeficiente	Classe
Muito baixo	1	N (0 – 22,5° e 337,5 – 360°)
Baixo	2	NE (22,5 – 67,5°) e NW (292,5 – 337,5°)
Moderado	3	E (67,5 – 112,5°) e W (247,5 – 292,5°)
Alto	4	SE (112,5 – 167,5°) e SW (212,5 – 247,5°)
Muito alto	5	S (167,5 – 212,5°)

Fonte: Próprio autor.



Tabela 8- Coeficientes de normalização da variável curvatura.

Suscetibilidade a Defeitos	Coeficiente	Classe
Muito baixo	1	Convexo – Divergente
Baixo	2	Convexo – Planar / Planar – Divergente
Moderado	3	Planar – Planar /
Alto	4	Convexo – Convergente / Planar – Convergente / Côncavo – Divergente / Côncavo – Planar
Muito alto	5	Côncavo – Convergente

Fonte: Próprio autor.

Tabela 9- Coeficientes de normalização da variável TPI.

Suscetibilidade a Defeitos	Coeficiente	Classe
Muito baixo	1	> 25
Baixo	2	5 a 25
Moderado	3	-5 a 5
Alto	4	-20 a -5
Muito alto	5	< -20

Fonte: Próprio autor.

Tabela 10- Coeficientes de normalização da variável TWI.

Suscetibilidade a Defeitos	Coeficiente	Classe
Muito baixo	1	< 9
Baixo	2	9 a 10
Moderado	3	10 a 14,5
Alto	4	14,5 a 19
Muito alto	5	> 19

Fonte: Próprio autor.

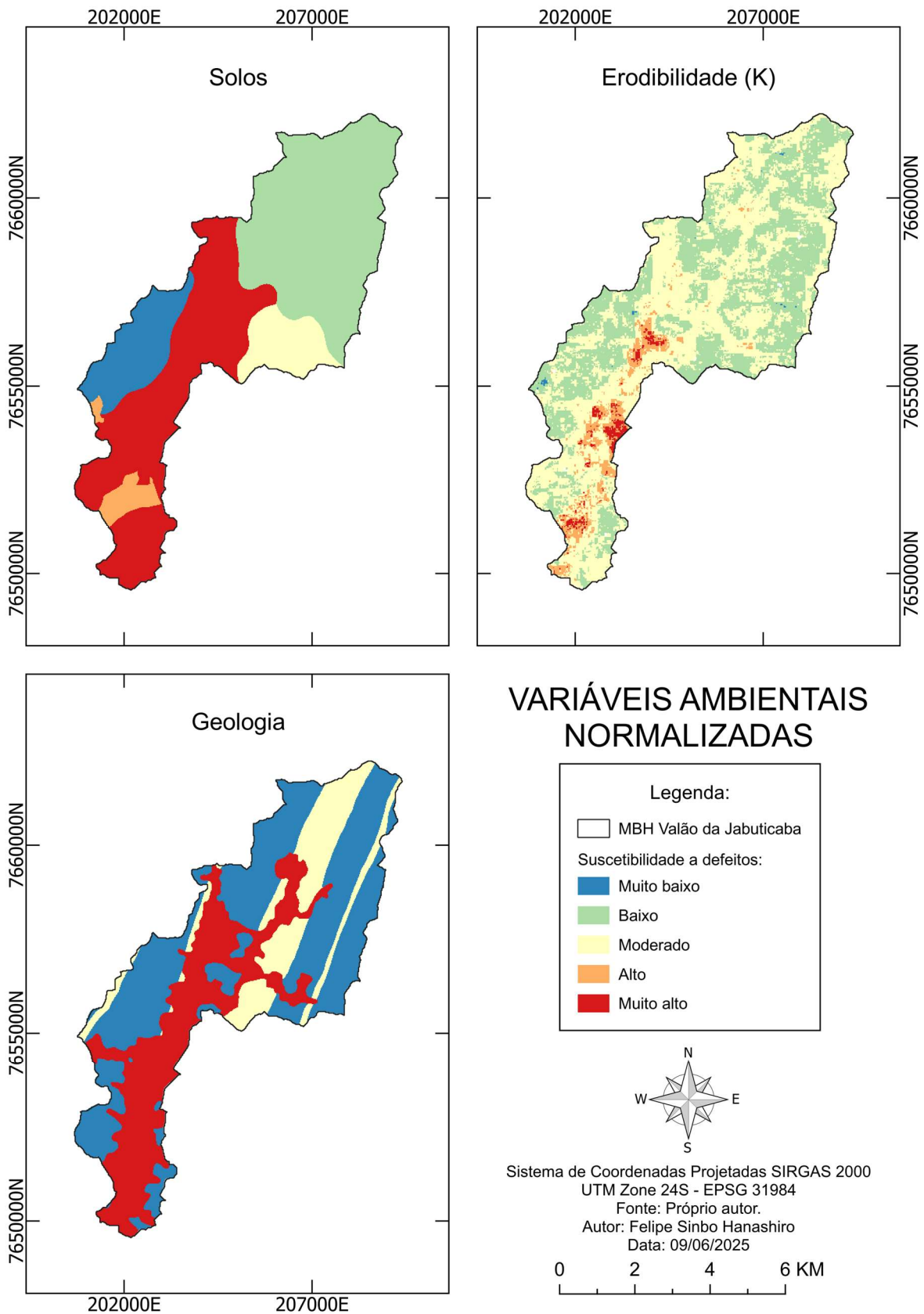


Figura 15- Mapas das variáveis normalizadas solos, erodibilidade (K) e geologia.

Fonte: Próprio autor.

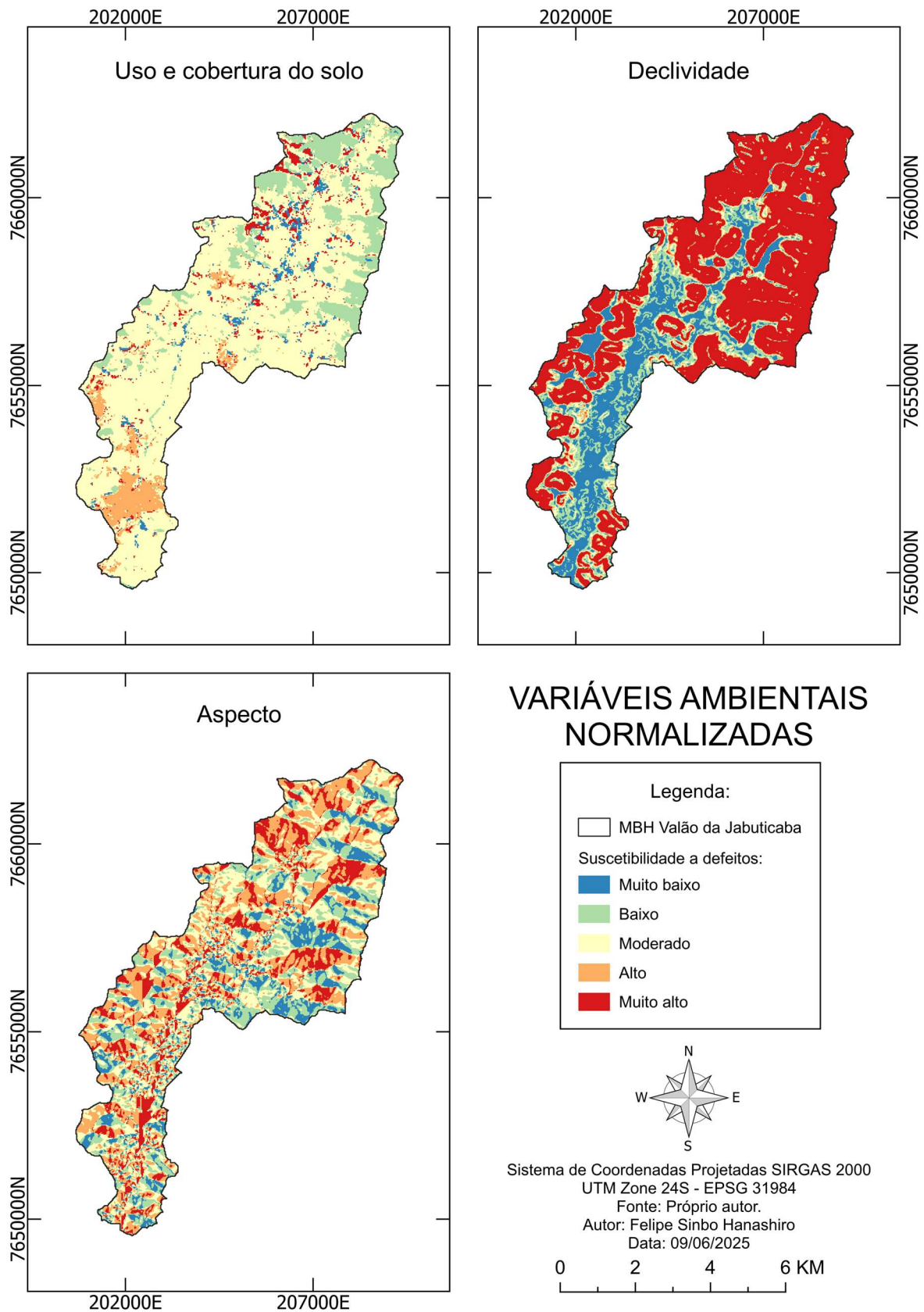


Figura 16- Mapa das variáveis normalizadas uso e cobertura do solo, declividade e aspecto.

Fonte: Próprio autor.

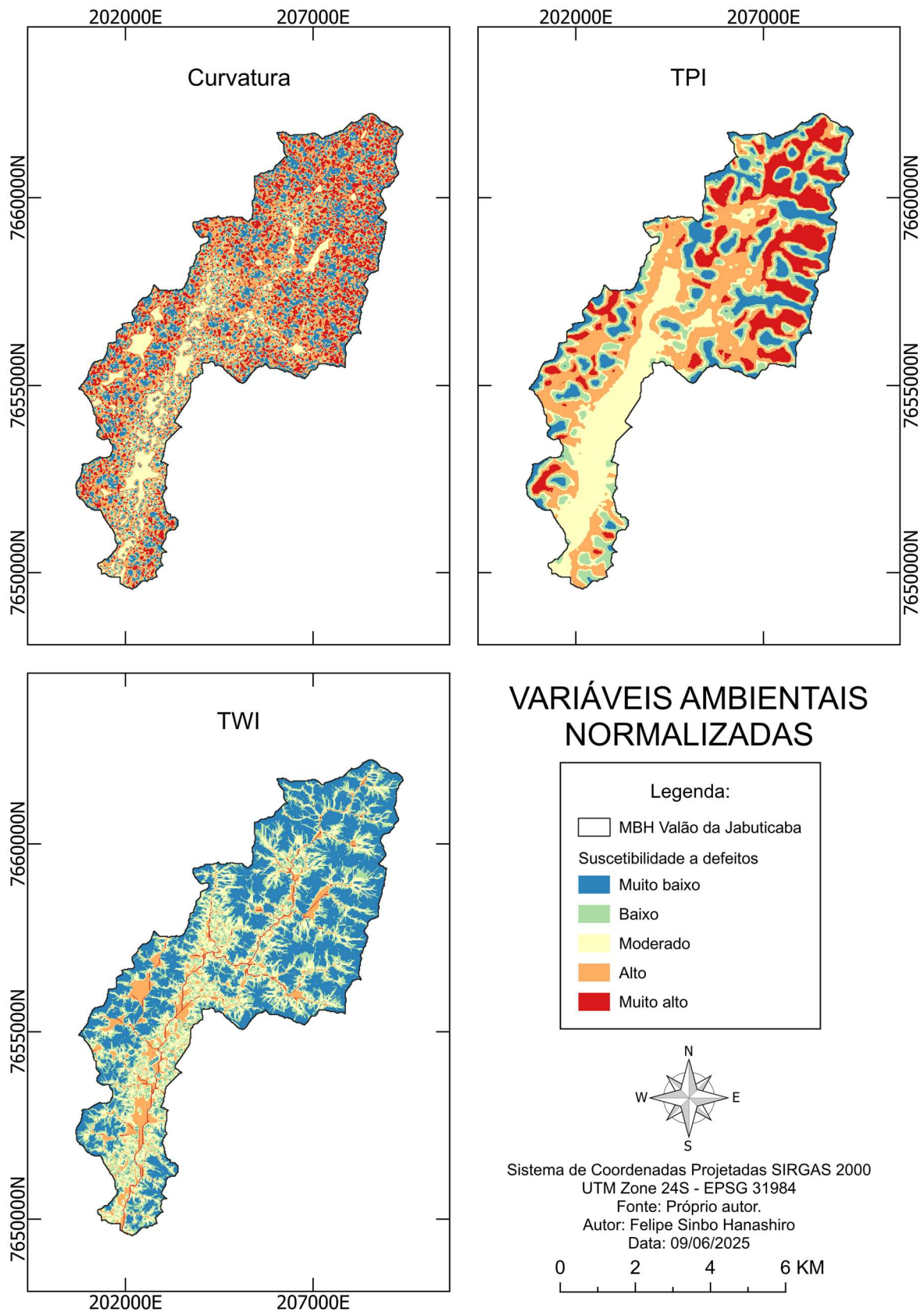


Figura 17- Mapas das variáveis normalizadas curvatura, TPI e TWI.

Fonte: Próprio autor.

Para determinar a importância relativa de cada variável no mapeamento, foi aplicado o método do Processo Analítico Hierárquico (AHP).

A hierarquização foi definida com base em revisões da literatura e conhecimento especialista, que apontaram a declividade como variável predominante, seguido por TPI, curvatura, TWI, solos, erodibilidade, uso e cobertura do solo, aspecto e geologia.

Na Tabela 11, são apresentados a matriz de comparação pareada e os pesos ponderados na análise AHP. Esses pesos foram determinados pelo principal autovetor da matriz de decisão, refletindo as contribuições relativas de cada critério com base nas 36 comparações realizadas ao longo do processo.

Tabela 11- Matriz de comparação pareada do método AHP e pesos ponderados das variáveis.

Variáveis	Solos	Erod.	Geolog.	Uso Cob.	Decliv.	Aspecto	Curvat.	TPI	TWI	Peso (%)
Solos	1	1	5	3	1/5	5	1/3	1/5	1	8,05
Erodibilidade	1	1	5	1	1/7	3	1/3	1/5	1/3	5,61
Geologia	1/5	1/5	1	1/3	1/9	1	1/7	1/9	1/5	2,03
Uso e Cobert	1/3	1	3	1	1/7	1	1/5	1/5	1/3	3,83
Declividade	5	7	9	7	1	9	3	3	3	32,35
Aspecto	1/5	1/3	1	1	1/9	1	1/5	1/7	1/3	2,67
Curvatura	3	3	7	5	1/3	5	1	1	1	14,76
TPI	5	5	9	5	1/3	7	1	1	3	20,43
TWI	1	3	5	3	1/3	3	1	1/3	1	10,26

Fonte: Próprio autor.

CR = 0,043

A análise dos pesos revela um domínio claro das variáveis geomorfométricas. A variável declividade foi a mais influente (32,35%), corroborando a literatura que a aponta como principal fator de processos erosivos em estradas de terra (Américo, 2018; Oliveira, 2023; Chiteculo et al., 2022; Shinzato et al., 2023). O TPI (20,43%), a curvatura (14,76%) e o TWI (10,26%) também apresentaram alta relevância, somando, juntos com a declividade, mais de 77% do peso total do modelo. Isso indica que a topografia e o fluxo de água superficial são os principais condicionantes para a degradação das estradas na área de estudo. Em contrapartida, fatores como geologia (2,03%) e aspecto (2,67%) tiveram menor impacto na ponderação final.

A Razão de Consistência (CR) de 0,043, sendo inferior a 0,10 (Saaty, 1994), valida a coerência dos julgamentos realizados na matriz de comparação, conferindo robustez aos pesos atribuídos.

4.2 Mapa de suscetibilidade a defeitos e identificação de trechos críticos

Os pesos obtidos pelo AHP foram aplicados às variáveis normalizadas por meio de uma Combinação Linear Ponderada (CLP). Elaborou-se o Mapa de Suscetibilidade a Defeitos (**Figura 18**). Este mapa representa a síntese da análise, espacializando o potencial de degradação em toda a microbacia. Áreas em tons de vermelho indicam alta e muito alta suscetibilidade, concentradas principalmente nas porções de relevo mais acidentado ao norte da bacia, onde as declividades são maiores, e nos fundos de vale, onde há acúmulo de umidade.

A análise do mapa revelou a predominância dos graus de suscetibilidade a defeitos “Alto” e “Moderado” na microbacia, 2083,08 ha (50,08%) e 1731,48 ha (41,63%), respectivamente. A classe “Muito alto” somou 313,60 ha (7,54%) e a “Baixo” 31,08 ha (0,75%).

A classe “Muito baixo” não foi encontrada na análise.

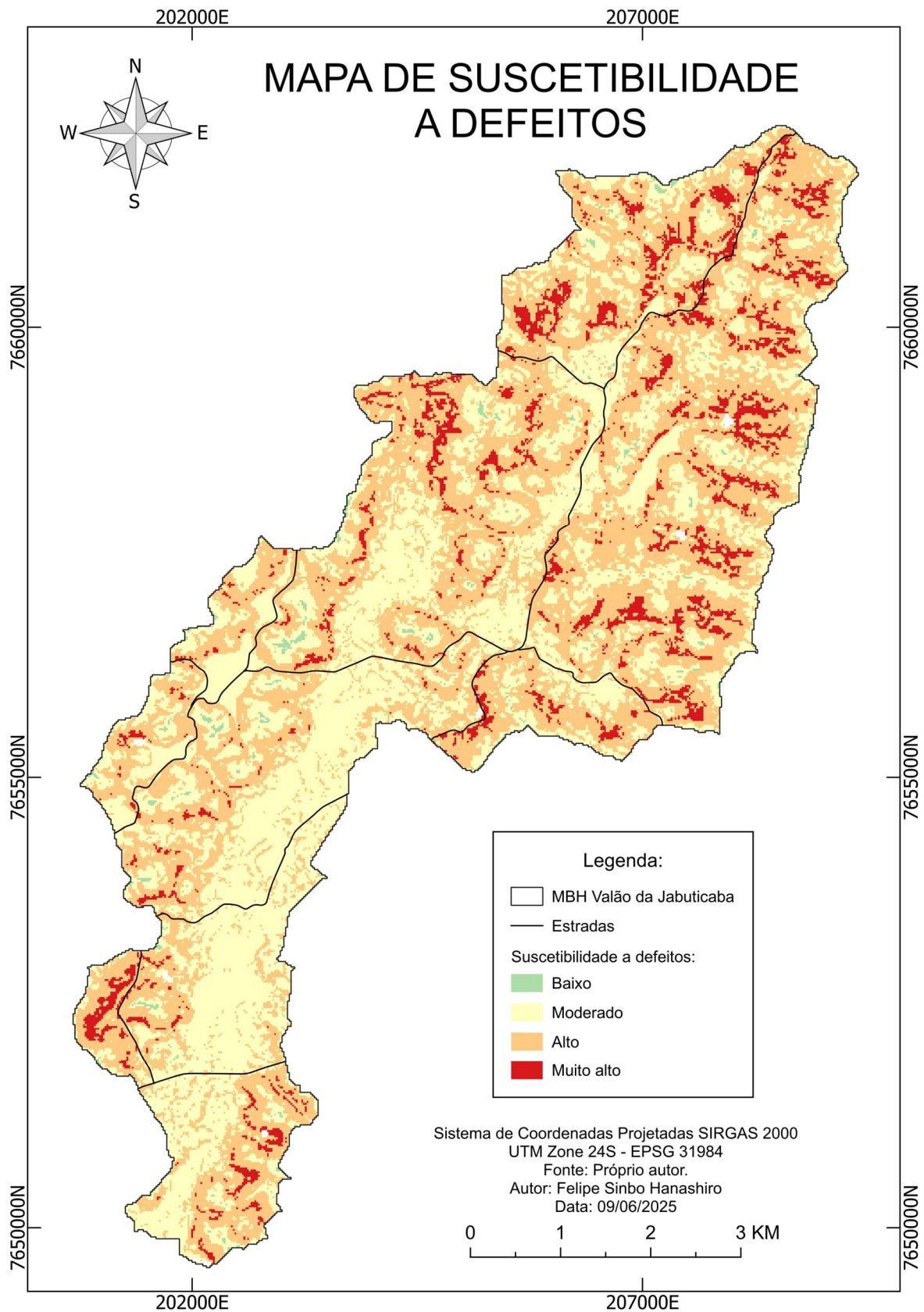


Figura 18- Mapa de classificação de Suscetibilidade a Defeitos.

Fonte: Próprio autor.



Ao sobrepor a malha viária ao mapa de suscetibilidade a defeitos, foi possível classificar as estradas (**Figura 19**) e identificar os trechos críticos (**Figura 20**). O resultado é um diagnóstico espacial que permite visualizar quais segmentos da rede viária estão mais propensos a apresentar problemas, servindo como uma ferramenta de gestão para a priorização de ações de manutenção e adequação.

Os trechos de estradas de terra classificados com o grau de suscetibilidade a defeitos “Muito alto” totalizaram 4,13 km (25,71%). Enquanto que os trechos classificados com o grau “Alto” somaram 9,42 km, 51,64% das estradas de terra da microbacia, sendo a classe predominante. Já a classe “Moderado”, somou 4,69 km (22,64%). Nenhum trecho foi classificado como “Muito baixo” ou “Baixo”.

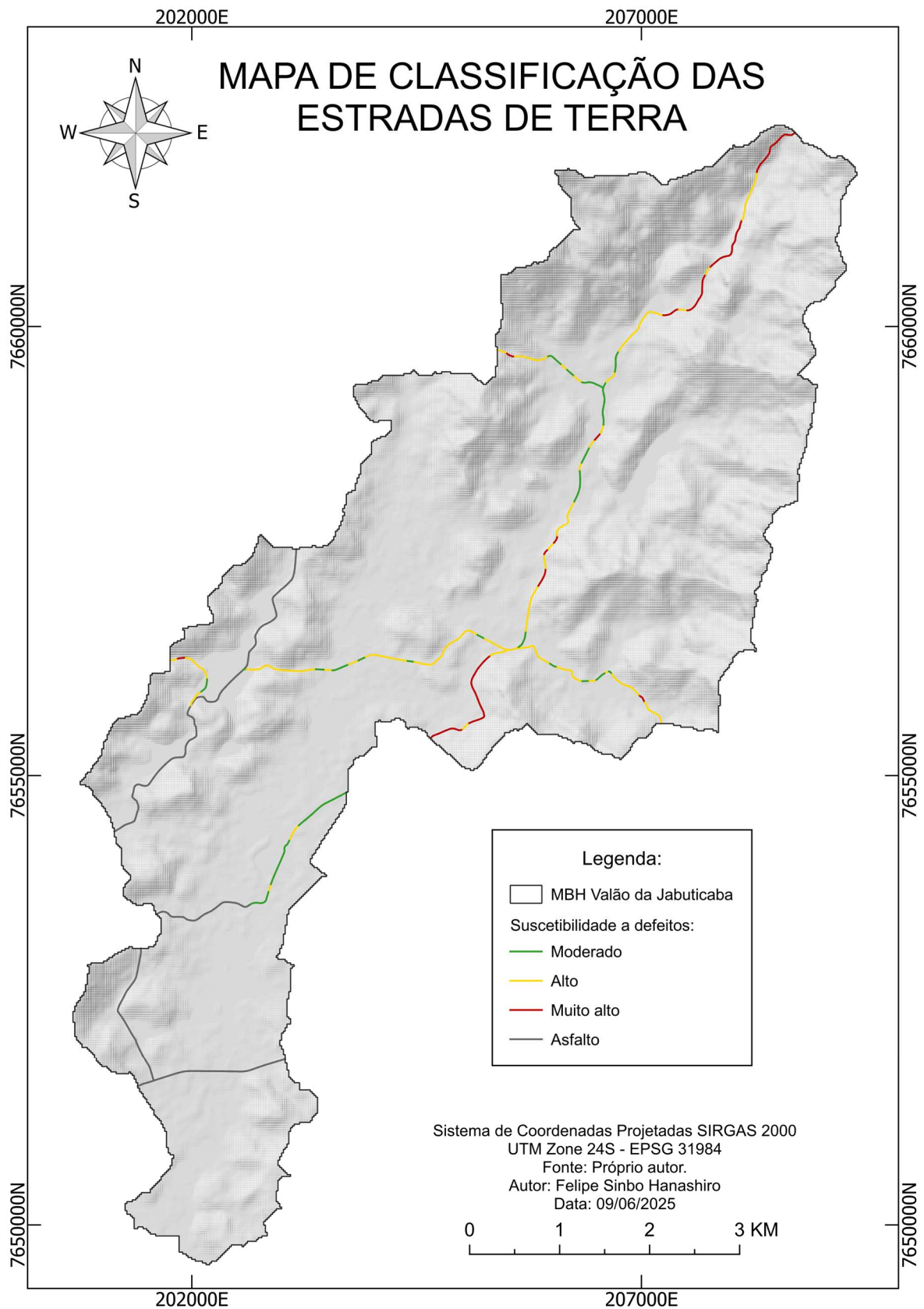


Figura 19- Mapa de classificação de suscetibilidade a defeitos das estradas de terra.

Fonte: Próprio autor.

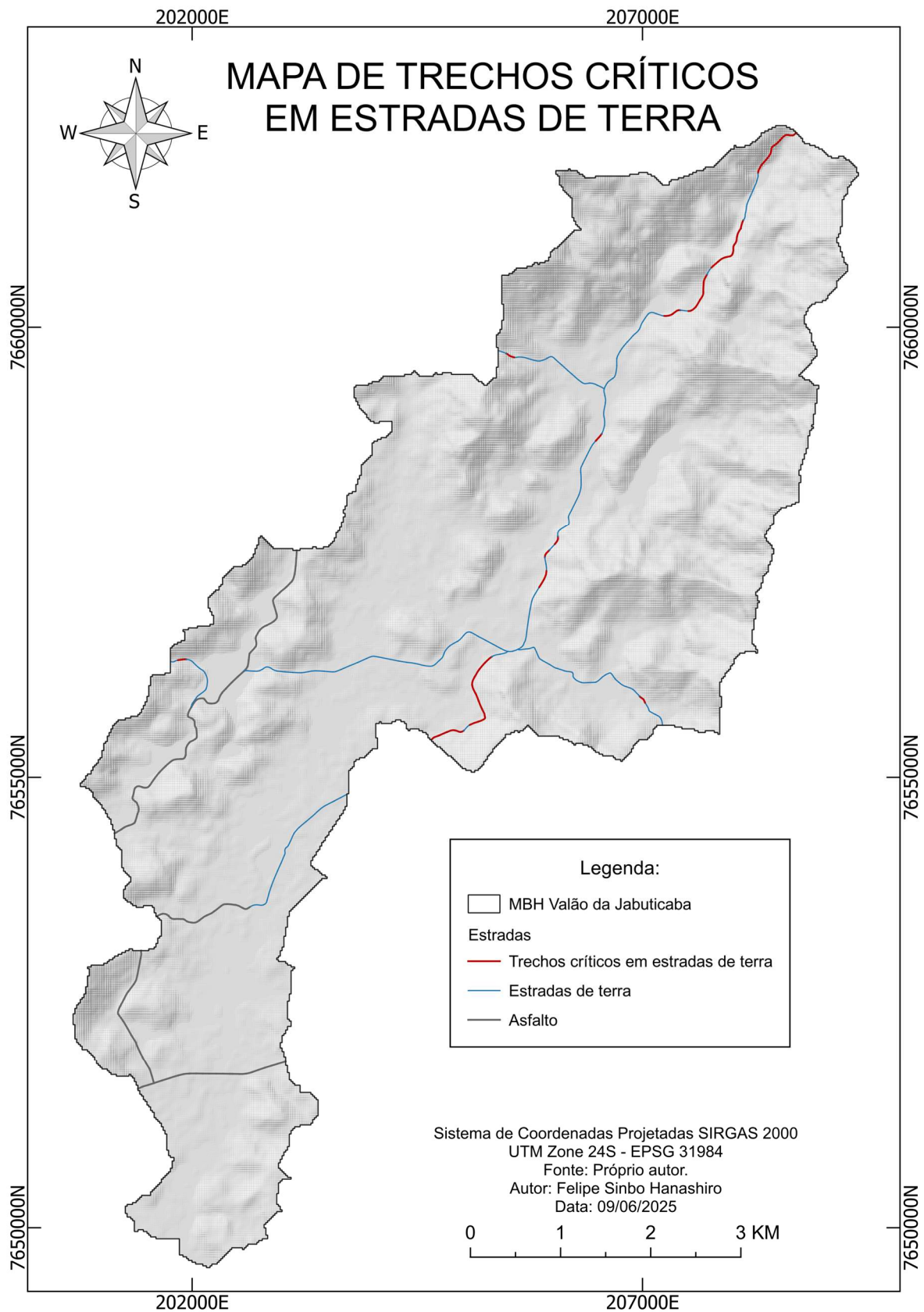


Figura 20- Mapa dos trechos críticos identificados nas estradas de terra.

Fonte: Próprio autor.



4.3 Validação da metodologia com dados de campo

A validação do modelo foi realizada comparando a classificação predita com as observações de 41 pontos levantados em campo (**Figura 21** e Tabela 12), utilizando a análise ROC/AUC. Em campo, constatou-se a ocorrência de diversos defeitos, como buracos, atoleiros, erosão em sulcos e afloramentos rochosos, confirmando a relevância dos problemas estudados (Figuras 22 a 27).

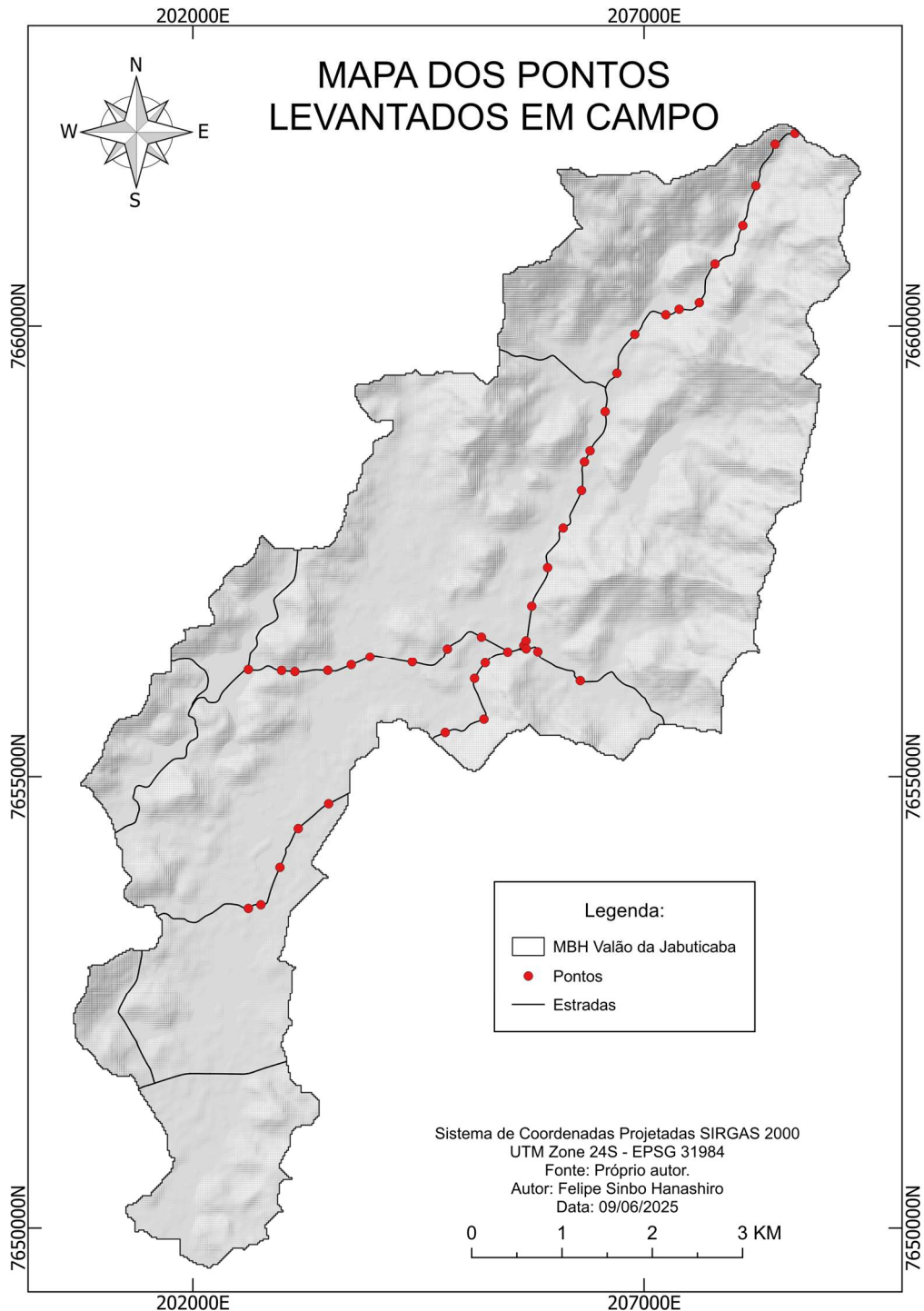


Figura 21- Mapa dos pontos levantados nas estradas de terra.

Fonte: Próprio autor.



Tabela 12- Classificação dos pontos levantados em campo conforme metodologia adaptada GPM.

Ponto	X	Y	Classificação	Ponto	X	Y	Classificação
1	202614,114	7656184,261	ruim	22	207388,403	7660186,716	muito ruim
2	202982,353	7656173,845	ruim	23	207612,291	7660259,500	muito ruim
3	203129,748	7656161,876	ruim	24	207785,683	7660688,633	muito ruim
4	203494,642	7656175,435	ruim	25	208094,087	7661114,722	ruim
5	203754,598	7656238,736	regular	26	208238,694	7661556,192	ruim
6	203962,527	7656328,357	ruim	27	208452,332	7662016,164	ruim
7	204430,872	7656270,839	regular	28	208671,982	7662136,280	muito ruim
8	204820,286	7656418,226	regular	29	205488,483	7656384,872	ruim
9	205197,182	7656550,973	muito ruim	30	205239,390	7656260,294	muito ruim
10	205666,779	7656458,094	regular	31	205121,004	7656086,305	ruim
11	205690,704	7656509,384	ruim	32	205225,136	7655634,396	ruim
12	205755,017	7656894,605	regular	33	204795,816	7655487,741	muito ruim
13	205930,731	7657322,371	regular	34	203503,780	7654699,344	regular
14	206102,932	7657761,153	regular	35	203167,122	7654424,549	ruim
15	206306,510	7658178,107	muito ruim	36	202964,097	7653995,911	ruim
16	206339,318	7658495,277	ruim	37	202753,112	7653582,861	ruim
17	206400,758	7658617,487	regular	38	202614,275	7653542,341	regular
18	206568,183	7659051,853	regular	39	205693,645	7656421,347	ruim
19	206699,080	7659477,255	regular	40	205822,305	7656388,736	ruim
20	206896,736	7659908,053	regular	41	206292,759	7656061,164	ruim
21	207240,721	7660125,588	ruim				

Fonte: Próprio autor.



Figura 22- Trecho da estrada Valão da Jabuticaba com a presença de buracos severos.

Fonte: Próprio autor.



Figura 23- Trecho da estrada Valão da Jabuticaba com formação de areiões.

Fonte: Próprio autor.



Figura 24- Trecho da estrada Valão da Jabuticaba x Colibri com atoleiros.

Fonte: Próprio autor.



Figura 25- Trecho da estrada Valão da Jabuticaba apresentando erosão em sulcos.

Fonte: Próprio autor.



Figura 26- Trecho da estrada Valão da Jabuticaba x Colibri apresentando pista de escorregadia.

Fonte: Próprio autor.



Figura 27- Trecho da estrada Valão da Jabuticaba com afloramento de rochas.

Fonte: Próprio autor.

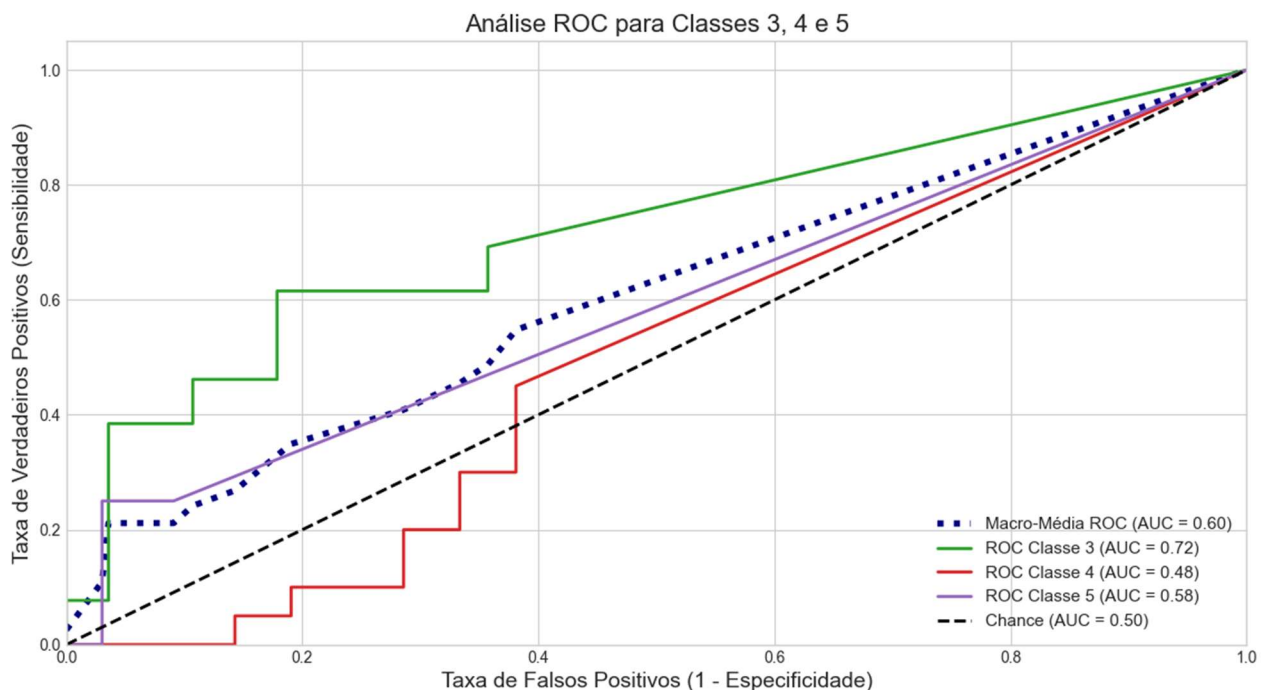


Os resultados da análise ROC/AUC (**Figura 28**) indicam um desempenho geral do modelo superior a uma classificação aleatória, com uma Macro-Média ROC de AUC = 0,60. A performance variou entre as classes:

Classe 3 (Moderado): O modelo apresentou boa capacidade preditiva (AUC = 0,72), conseguindo distinguir com sucesso os trechos que se encontram em condições regulares.

Classe 5 (Muito alto): A performance foi moderada (AUC = 0,58), mostrando que o modelo tem uma capacidade limitada, mas ainda positiva, de identificar os trechos em piores condições.

Classe 4 (Alto): O desempenho para esta classe foi insatisfatório (AUC = 0,48), ficando



abaixo do limiar da aleatoriedade.

Figura 28- Gráfico da análise ROC/AUC Um-vs-Todos das classes 3 (Moderado), 4 (Alto) e 5 (Muito alto).

Fonte: Próprio autor.

A análise desses resultados permite uma discussão aprofundada sobre as potencialidades e limitações do modelo. A boa performance para a classe "Moderado" e a performance moderada para a "Muito alto" sugerem que as variáveis ambientais estáticas (como declividade, tipo de solo e TPI) são eficazes para identificar os extremos: áreas de baixo risco e áreas de risco muito elevado devido a condições intrínsecas do terreno.

No entanto, a dificuldade em classificar corretamente a classe intermediária "Alto" indica que a condição atual de um trecho de estrada não depende apenas de fatores ambientais. Fatores dinâmicos, não incluídos no modelo, como o histórico de manutenção, a frequência e o tipo de tráfego de veículos (caminhões pesados, por exemplo), e a existência de obras de drenagem pontuais (bigodes, caixas de contenção), provavelmente desempenham um papel crucial na determinação se um trecho vulnerável se encontra em estado "Alto" ou "Muito alto" em um dado momento.



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de suas limitações, a metodologia proposta se mostrou uma ferramenta de grande valia para a gestão pública. Sendo de baixo custo e baseada em dados abertos e software livre, ela oferece um diagnóstico inicial robusto. O mapa de trechos críticos permite otimizar a alocação de recursos, direcionando as vistorias de campo e as ações de manutenção para as áreas de maior suscetibilidade, onde a probabilidade de encontrar ou desenvolver defeitos severos é significativamente maior. Ele funciona, portanto, como um excelente ponto de partida para um planejamento de manutenção mais eficiente e proativo.



6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDI, E.; MAJNOUNIAN, B.; DARVISHSEFAT, A.; MASHAYEKHI, Z.; SESSIONS, J. A GIS-MCE based model for forest road planning. **Journal of Forest Science**, Praha, v.55, i. 4, p. 171-176, abr. 2009. DOI 10.17221/52/2008-jfs. Disponível em: http://jfs.agriculturejournals.cz/artkey/jfs-200904-0004_a-gis-mce-based-model-for-forest-road-planning.php. Acesso em: 30 jan. 2025.

AMÉRICO, Carla. **Microplanejamento de estradas florestais por meio de geotecnologias**. 2018. 48 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento e uso de recursos renováveis) – Centro de Ciências e Tecnologias para Sustentabilidade, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/10121>. Acesso em: 15 jan. 2025.

ARRB – Australian Road Research Board's. **Unsealed Roads: Best Practice Guide**. Ed. 2. Melbourne: ARRB, 2020. 346 p. Disponível em: <https://www.arrb.com.au/bestpracticeguides>. Acesso em: 14 out. 2024.

BAESSO, D. P.; GONÇALVES, F. L. R. **Estradas Rurais: Técnicas Adequadas de Manutenção**. Florianópolis: DER/SC, 2003. 236 p.

BANDEIRA, I. C. N.; TEIXEIRA, S. G. Determinação indireta da erodibilidade do talude marginal da comunidade Fátima de Urucurituba, Município de Santarém, Pará, Brasil e sua relação com suscetibilidade à erosão fluvial. **Informe Técnico-Científico de Prevenção de Desastres e Ordenamento Territorial**, Serviço Geológico do Brasil – CPRM, Rio de Janeiro, v. 1, n. 1, dez. 2020. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br>. Acesso em: 31 jan. 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Estradas Rurais: Orientações para Construção, Adequação e Manutenção**. 1. ed. Brasília: MAPA, 2021. 44 p. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/programa-aguas-do-agro/arquivos/orientacoes_ada_2_estradasvicinais1_m.pdf. Acesso em: 14 out. 2024.

BUĞDAY, E.; AKAY, A.E. Evaluation of forest road network planning in landslide sensitive areas by GIS-based multi-criteria decision making approaches in Ihsangazi Watershed, Northern Turkey. **Sumarski List**, v. 143, n. 7-8, 2019. Disponível em: <http://doi.org/10.31298/sl.143.7-8.4>. Acesso em: 30 jan. 2025.

BUĞDAY, E.; ÖZEL, H.B. Utilizing a fuzzy inference system (FIS) and modified analytical hierarchical analysis for forest road network planning in afforested lands. **Pol. J. of Environ. Stud.**, v. 28, n. 3, p. 1579-1589, 2019. DOI: 10.15244/pjoes/89611. Disponível em: <http://doi.org/10.15244/pjoes/89611>. Acesso em: 30 jan. 2025.

BUHLER, A. **Estradas rurais, uma porta para o desenvolvimento e conectividade territorial**: Brasil. Caracas: CAF: 2023. ISBN: 978-980-422-312-9. Disponível em: <https://scioteca.caf.com/>. Acesso em: 03 mai. 2025.

CNT - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de Rodovias 2024**. Brasília: CNT, 2024. 224 p. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/conteudo>. Acesso em: 14 jan. 2025.

COULTER, E. D.; SESSIONS, J.; WING, M. G. Scheduling forest road maintenance using the analytic hierarchy process and heuristics. **Silva Fennica**, Helsinki, v. 40, n. 1, p. 143-160, jan. 2006. DOI: 10.14214/sf.357. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/260171486>. Acesso em: 31 mar. 2025.



CHITECULO, V.; ABDOLLAHNEJAD, A.; PANAGIOTIDIS, D.; SUROVÝ, P. Effects, Monitoring, and Management of Forest Roads Using remote sensing and GIS in Angolan Miombo woodlands. *Forests*, Basel, 13(4), 524, mar. 2022. DOI 10.3390/f13040524. Disponível em: <http://doi.org/10.3390/f13040524>. Acesso em: 30 jan. 2025.

ÇALIŞKAN, E.; BEDIROGLU, Ş; YILDIRIM, V. Determination forest road routes via GIS-based spatial multi-criterion decision methods. *Applied Ecology and Environmental Research*, Budapest, v. 17, n. 1, p. 759-779, 2019. Disponível em: DOI: http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1701_759779. Acesso em: 31 mar. 2025.

DER/SP – Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. **Manual Básico de Estradas e Rodovias Vicinais: Volume I – Planejamento, projeto, construção e operação.** São Paulo: DER/SP, 2012. v. 1, 226 p. Disponível em: https://www.der.sp.gov.br/WebSite/Arquivos/manuais/Manual_Basico_de_Estradas_e_Rodovias_Vicinais-Volume_I.pdf. Acesso em: 14 out. 2024.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de implantação básica de rodovia.** 3 ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2010. 617 p. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/742_manual_de_implantacao_basica.pdf. Acesso em: 14 out. 2024.

DRAŽIĆ S.; DANILOVIĆ M.; RISTIĆ R.; STOJNIĆ D.; ANTONIĆ S. Evaluation of morphometric terrain parameters and their influence on determining optimal density of primary forest road network. *Croatian Journal of Forest Engineering*, Zagreb, v. 44, n. 02, p. 12, 2023. DOI 10.5552/crojfe.2023.2097. Disponível em: <http://doi.org/10.5552/crojfe.2023.2097>. Acesso em: 30 jan. 2025.

DRĂGOI, M.; PALAGHLANU, C.; MIRON-ONCLUL, M. Benefit, cost and risk analysis on extending, the forest roads network: A case study in Crasna Valley (Romania). *Ann. For. Res.* v. 58, n. 2, p. 333-345, abr. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.15287/afr.2015.366>. Acesso em: 30 out. 2024.

DUARTE, B. P. et al. **Geologia e recursos minerais da folha Itaperuna SF.24-V-C-I, estado do Rio de Janeiro escala 1:100.000.** Belo Horizonte: CPRM, 2012. 138 p. Mapa Geológico. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/11374>. Acesso em: 12 mai. 2025.

EMATER-MG. **Caminhos sustentáveis:** Guia prático para adequação e conservação de estradas rurais. Belo Horizonte: Emater-MG, 2024. 80 p. Disponível em: <https://www.emater.mg.gov.br/download.do?id=89211>. Acesso em: 14 fev. 2025.

FARIA, V. G. **Priorização de áreas para restauração florestal visando conservar solo, água e biodiversidade em paisagens agrícolas.** 2016. 128 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade Estadual de São Paulo, Piracicaba, 2016. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-06042016-135928/publico/Vinicius_Guidotti_de_Faria_versao_revisada.pdf. Acesso em: 20 mai. 2025.

GUMUS, S. An evaluation of stakeholder perception differences in forest road assessment factors using the analytic hierarchy process (AHP). *Forests*, v. 8., n. 5, p. 1-9, mai. 2017. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1999-4907/8/5/165>. Acesso em: 30 out. 2024.

HOSSEINI, S. A. O.; MOGHADASI, P.; FALLAH, A. Forest road network design based on multipurpose forestry management in Hyrcanian forest. *JESAM*, v. 22, n. 2, p. 13-20, dez. 2019. Disponível em: https://doi.org/10.47125/jesam/2019_2/03. Acesso em: 31 mar. 2025.



KELLER, G.; SHERAR, J. **Low-Volume Roads Engineering: best management practices field guide**. Washington: USDA, 2003. Disponível em: https://www.fs.usda.gov/t-d/programs/forest_mgmt/projects/lowvolroads/. Acesso em: 22 jan. 2025.

KOLKOS, G.; STERGIADOU, A.; KANTARTZIS, A.; TAMPEKIS, S. ; ARABATZIS, G. Effects of forest roads and an assessment of their disturbance of the natural environment based on GIS spatial multi-criteria analysis: case study of the University Forest of Taxiarchis, Chalkidiki, Greece. **Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration**, v. 8, p. 425-440, abr. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s41207-023-00362-6>. Acesso em: 31 out. 2024.

MAPBIOMAS. **MapBiomas – Coleção 2 da série de mapas de Granulometria do Solo do Brasil (versão beta)**. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/dados-mapbiomas-solo/>. Acesso em: 13 mai. 2025. Base de dados.

MARTINS, F. C. M.; ANDRADE, L. C. R.; CALIJURI, M. L.; BARROS, K. O.; BARRETO, E. Multicriteria analysis and geoprocessing for conservation of unpaved roads. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 37, n. 2, p. 162-170, jun. 2014. Disponível em: http://scielo.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0871-018X2014000200006&lang=pt. Acesso em: 31 out. 2024.

MARTORANO, L. G. et al. Aspectos Climáticos do Noroeste Fluminense, RJ. Embrapa Solos Documentos, Rio de Janeiro, n. 43, set. 2003. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/338495>. Acesso em: 27 jan. 2025.

ODA, S. **Caracterização de uma rede municipal de estradas não-pavimentadas**. 1995. 186 p. Dissertação (Mestrado em Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-14012005-161818/>. Acesso em: 13 jan. 2025.

OLIVEIRA, A. **Análise e identificação de gestão das estradas rurais na mesorregião noroeste do paraná**. 2021. 77 p. Dissertação (Mestrado do programa de Desenvolvimento Regional e Agronegócio) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2022. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/handle/tede/6124>. Acesso em: 16 jan. 2025.

OLIVEIRA, D. S. **Análise multicritério aplicada ao diagnóstico e adequação de estradas florestais**. 2023. 45 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, 2023. Disponível em: <http://tede.unicentro.br:8080/jspui/handle/jspui/2162>. Acesso em: 15 jan. 2025.

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process – what it is and how it is used. **Mathematical Modelling**, v. 9, n. 3-5, p. 161-76, 1987. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0270025587904738>. Acesso em: 05 mai. 2025.

SAATY, T. L. How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. **Interfaces**, v. 24, n. 6, p. 19-43, 1994. Disponível em: <https://doi.org/10.1287/inte.24.6.19>. Acesso em: 05. mai. 2025.

SAMANI, K. M.; HOSSEINY, S. A.; LOTFALIAN, M.; NAJAFI, A. Planning road network in mountain forests using GIS and Analytic Hierarchical Process (AHP). **Caspian J. Env. Sci.** v. 8, n. 2, p. 151-162, 2010. Disponível em: https://cjes.guilan.ac.ir/article_1049.html. Acesso em: 31 mar. 2025.



SANTOS, A. R.; PASTORE, E. L.; AUGUSTO JUNIOR, F.; CUNHA, M. A. **Estradas Vicinais de Terra: Manual Técnico para Conservação e Recuperação**. 3 ed. São Paulo: ABGE, 2019. Disponível em: <https://www.abge.org.br/manual-de-estradas-vicinais>. Acesso em: 14 out. 2024.

SHIBA, M. Analytic Hierarchy Process (AHP)-Based Multi-Attribute benefit structure analysis of road network system in mountainous rural areas of Japan. **Journal of Forest Engineering**. p. 41-50, 1995. Disponível em: <https://journals.lib.unb.ca/index.php/IJFE/article/view/30162>. Acesso em: 31 mar. 2025.

SHINZATO E.T.; MOREIRA G.G.; FERREIRA K.; FERRAZ S.F. B.; HAKAMADA R. Priorização de operações de manutenção de estradas florestais por meio de indicadores hidrológicos. *Scientia Forestalis*, 51, e3921, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.18671/scifor.v51.08>. Acesso em: 30 jan. 2025.

SILVA, A. D. C.; NASCIMENTO, J. W. S.; SAMPAIO, A. T.; SHUSTER, S. L.; PACHECO, L. C.; SANTOS, G. M. Diagnósticos e recuperações em estradas vicinais. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC, 8., 2022, Goiânia. **Anais [...]**. Brasília: CONFEA, 2022. Disponível em: <https://www.confea.org.br/eventos/contecc/contecc-2022/civil>. Acesso em: 03 mai. 2025.

VERDUM, R.; VIEIRA, C. L.; CANEPPELE, J. C. G. **Métodos e técnicas para o controle da erosão e conservação do solo**. Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2016. 50 f. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/189684/001007309.pdf>. Acesso em: 03 mai. 2025.

WEAVER, W. E.; WEPPNER, E. M.; HAGANS, D. K. **Manual de caminos forestales y rurales: Una guía para planificar, diseñar, construir, reconstruir, mejorar, mantener y cerrar caminos forestales**. Ukiah: MCRCD, 2014. 416 p. Disponível em: <https://www.pacificwatershed.com/>. Acesso em: 06 fev. 2025.

7. ANEXOS

Anexo A



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
COORDENADORIA DE EDUCAÇÃO A DISTÂNCIA



ATA N° 3648/2025 - CEAD (12.28.01.36)

N° do Protocolo: 23083.040659/2025-98

Seropédica-RJ, 25 de julho de 2025.

ATA DE DEFESA

Aos dezessete dias do mês de julho do ano de dois mil e vinte e cinco, às dez horas, através de web conferência, instalou-se a banca examinadora de Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização em Geoprocessamento, Levantamento e Interpretação de Solos, do cursista **Felipe Sinbo Hanashiro** sob a orientação do professor **Gustavo Souto Perdigão Granha**. A banca examinadora foi composta pelas professoras/pesquisadoras **Niriele Bruno Rodrigues** e **Mariana Oliveira da Costa**. A defesa do TCC intitulado "**Identificação de Trechos Críticos em Estradas de Terra Utilizando Técnicas de Geoprocessamento e Análise Multicritério na Microbacia Valão da Jabuticaba no Município de Itaperuna-RJ**", foi iniciada às dez horas e teve a duração de vinte minutos de apresentação seguida da avaliação pela banca. O cursista, após avaliado pela banca examinadora obteve o resultado:

(X) APROVADO, devendo o cursista proceder a eventual revisão solicitada pelo supervisor e /ou pela banca, e entregar a versão final em até quinze dias à coordenação do Curso.

() NÃO APROVADO.

Seropédica, 17 de julho de 2025.

Niriele Bruno Rodrigues

Primeira Examinadora

Mariana Oliveira da Costa

Segunda Examinadora

Gustavo Souto Perdigão Granha

Presidente

Felipe Sinbo Hanashiro

Cursista



(Assinado digitalmente em 25/07/2025 15:46)
GUSTAVO SOUTO PERDIGAO GRANHA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeGEOIM (12.28.01.00.00.87)
Matricula: ###524#0

(Assinado digitalmente em 25/07/2025 17:20)
MARIANA OLIVEIRA DA COSTA
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.087-##

(Assinado digitalmente em 25/07/2025 20:04)
FELIPE SINBO HANASHIRO
DISCENTE
Matricula: 2024#####6

(Assinado digitalmente em 25/07/2025 12:29)
NIRIELE BRUNO RODRIGUES
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.797-##

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrj.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: 3648, ano: 2025, tipo: ATA, data de emissão: 25/07/2025 e o código de verificação: a899e256d6