

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RENAN FABRES DALMONECH

PROPOSTA METODOLÓGICA PARA A ELABORAÇÃO DE MAPAS DE
TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS E AUTOMAÇÃO DE ROTAS COM EMPREGO
DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO

CURITIBA

2025

RENAN FABRES DALMONECH

PROPOSTA METODOLÓGICA PARA A ELABORAÇÃO DE MAPAS DE
TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS E AUTOMAÇÃO DE ROTAS COM EMPREGO
DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Campos Macedo

Coorientadora: Profa. Dra. Cláudia Maria de Almeida

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Dalmonech, Renan Fabres

Proposta metodológica para a elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas e automação de rotas com emprego de análise multicritério / Renan Fabres Dalmonech. – Curitiba, 2025.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas.

Orientador: Rodrigo de Campos Macedo

Coorientador: Cláudia Maria de Almeida

1. Sensoriamento Remoto. 2. Aprendizado de Máquina. 3. Mapas rodoviários. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. III. Macedo, Rodrigo de Campos. IV. Almeida, Cláudia Maria de. V. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **RENAN FABRES DALMONECH**, intitulada: **PROPOSTA METODOLÓGICA PARA A ELABORAÇÃO DE MAPAS DE TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS E AUTOMAÇÃO DE ROTAS COM EMPREGO DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO**, sob orientação do Prof. Dr. RODRIGO DE CAMPOS MACEDO, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 28 de Fevereiro de 2025.

Assinatura Eletrônica

03/03/2025 10:26:03.0

RODRIGO DE CAMPOS MACEDO

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

28/02/2025 16:34:54.0

DIEGO BOGADO TOMASIELLO

Avaliador Externo (ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO)

Assinatura Eletrônica

04/03/2025 12:39:49.0

JORGE ANTONIO SILVA CENTENO

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Ao meu avô José Dalmonech, pelos
ensinamentos transmitidos em vida.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Fernando e Rita, pelo amor e ensino de qualidade que me foi proporcionado durante a juventude;

À minha esposa Nelize, pelo apoio irrestrito e incondicional diário;

À Diretoria de Serviço Geográfico (DSG), pela confiança e oportunidade a mim concedida;

Ao Professor Dr. Rodrigo de Campos Macedo, pelo apoio e orientação em todos os momentos do curso;

À Professora Dra. Cláudia Maria de Almeida, pela coorientação agregadora e esclarecedora prestada durante os períodos de Qualificação e Defesa;

Aos professores do Curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, da Universidade Federal do Paraná, pelos conhecimentos sólidos e de qualidade transmitidos;

Aos meus professores do Instituto Militar de Engenharia (IME), pelos ensinamentos transmitidos durante a graduação, formadores de minha base como Engenheiro Cartógrafo;

Aos companheiros de curso, pela amizade e ajuda proporcionada nas disciplinas ministradas no biênio 2023-2024; e

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram e apoiaram a realização desta dissertação.

“Apesar de tudo, à medida que avançamos para a terra desconhecida do amanhã, é melhor ter um mapa geral e incompleto, sujeito a revisões, do que não ter mapa algum” (Alvin Toffler).

RESUMO

O Brasil, quinto maior país do mundo em extensão territorial, enfrenta desafios relacionados a uma malha viária mal planejada e administrada, o que evidencia a necessidade de soluções eficientes e de baixo custo capazes de auxiliar a trafegabilidade de viaturas. Quando as vias usuais se encontram comprometidas por motivo de caso fortuito ou força maior, autoridades de órgãos públicos ou de entidades privadas por vezes necessitam de produtos cartográficos de auxílio ao planejamento e à tomada de decisão. Os insumos de Sensoriamento Remoto – como tipo de solo, feições antrópicas, condições meteorológicas, vegetação, curso/corpos d'água, relevo etc. – podem ser integrados em Sistemas de Informações Geográficas a fim de se elaborarem mapas de trafegabilidade de viaturas, que permitem a visualização de áreas de restrições à trafegabilidade, e automatizar rotas sobre esses mapas. Neste estudo, buscou-se a utilização de insumos livres – obtidos gratuitamente por meio de repositórios digitais – visando-se à reprodutibilidade, replicabilidade e redução de custos do método desenvolvido, indo ao encontro do que prescreve os princípios da ciência aberta. Quanto aos procedimentos, foram utilizados algoritmos de Inteligência Artificial – mais especificamente do subgrupo de Aprendizado de Máquina – para a classificação de uso e cobertura da terra. Para tanto, foram empregadas imagens do Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (*China-Brazil Earth Resources Satellite*) CBERS 04A, captadas pela Câmera Multiespectral e Pancromática de Varredura Ampla (*Multispectral and Panchromatic Wide-Scan Camera* – WPM), em Análise de Imagem Baseada em Objetos Geográficos, com extração de classes por meio do classificador Floresta Aleatória e do segmentador Agrupamento Iterativo Linear Simples. Também, foram desenvolvidos dois modelos na plataforma de modelagem *Dinamica* EGO: um para a elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas, por meio de Análise de Decisão Multicritério operacionalizada pelo Processo Hierárquico Analítico; e outro para a automação de rotas com emprego do algoritmo roteador de Dijkstra. Os resultados obtidos com o uso desses modelos mostraram-se promissores, sendo validados por meio de dados coletados em levantamento de campo, dados auxiliares de alta resolução espacial e testes estatísticos. Por conseguinte, o método proposto para a elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas e para a automação de rotas é aplicável para novos estudos sobre a temática e viabiliza o emprego prático desses produtos cartográficos.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto; Classificação de Insumos Livres; Aprendizado de Máquina; Floresta Aleatória; Processo Hierárquico Analítico.

ABSTRACT

Brazil, the world's fifth-largest country in terms of land area, faces challenges related to a poorly planned and managed road networks, which highlights the need for efficient, low-cost solutions capable of assisting the trafficability. When the usual roads are compromised due to unforeseeable circumstances or force majeure, authorities from public institutions or private entities sometimes need cartographic products to help them plan and make decisions. Remote Sensing inputs - such as soil type, anthropogenic features, weather conditions, vegetation, watercourses/bodies, relief etc. - can be integrated into Geographic Information Systems to draw up vehicle trafficability maps, which make it possible to visualize areas of restricted traffic, and automate routes based on these maps. In this study, we sought to use free inputs - obtained free of charge through digital repositories - to reproduce, replicate and reduce the costs of the method developed, in line with the principles of open science. The method used Artificial Intelligence algorithms - more specifically from the Machine Learning subgroup - to classify land use and land cover. To this end, images from the China-Brazil Earth Resources Satellite CBERS 04A, through its Multispectral and Panchromatic Wide-Scan Camera (WPM), were used in Geographic Object Based Image Analysis, with class extraction using the Random Forest classifier and the Simple Linear Iterative Grouping segmenter. Two models were also developed on the Dinamica EGO modeling platform: one for drawing up vehicle trafficability maps using Multicriteria Decision Analysis operationalized by the Analytical Hierarchy Process; and the other for automating routes using the Dijkstra router algorithm. The results obtained using these models were promising and were validated using data collected in a field survey, high spatial resolution auxiliary data and statistical tests. Consequently, the method proposed for drawing up vehicle trafficability maps and automating routes is applicable to new studies on the subject and enables the practical application of these cartographic products.

Keywords: Remote Sensing; Classification of Free Inputs; Machine Learning; Random Forest; Analytic Hierarchy Process.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – TRÍADE DOS COMPONENTES MODELADORES DA TRAFEGABILIDADE.....	30
FIGURA 2.2 – FLUXO GENÉRICO DA PROGRAMAÇÃO TRADICIONAL (A) E DO APRENDIZADO DE MÁQUINA (B).....	31
FIGURA 2.3 – REPRESENTAÇÃO HIERÁRQUICA DO AHP PARA A ANÁLISE DA TRAFEGABILIDADE.....	36
FIGURA 2.4 – ALGORITMO DE DIJKSTRA APLICADO EM MAPAS DE TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS PARA BUSCA DA ROTA DE MENOR CUSTO.	40
FIGURA 2.5 – CAMADAS DE INFORMAÇÃO COMUNS NA ELABORAÇÃO DE MAPAS DE TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS.....	42
FIGURA 2.6 – QUANTIDADE DE VEZES EM QUE CADA CAMADA DE INFORMAÇÃO FOI UTILIZADA NOS ESTUDOS REVISADOS.....	45
FIGURA 2.7 – VIZINHANÇA 8 UTILIZADA NO CÁLCULO DO TRI.....	50
FIGURA 2.8 – PERCENTUAL DAS ESCALAS DE TRABALHO DOS ESTUDOS REVISADOS.	61
FIGURA 2.9 – LEVANTAMENTOS DE CAMPO REALIZADOS NOS ESTUDOS REVISADOS.....	63
FIGURA 2.10 – CAMPOS DE APLICAÇÃO DOS MAPAS DE TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS.	64
FIGURA 2.11 – QUANTIDADE DE VIATURAS POR TIPO ANALISADAS NOS ESTUDOS REVISADOS.....	65
FIGURA 2.12 – QUANTITATIVO DE ÁREAS DE ESTUDO SOBRE MAPAS DE TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS DESENVOLVIDOS EM DIFERENTES PAÍSES.	66
FIGURA 2.13 – EXEMPLOS DE MAPAS DE TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS ELABORADOS PELOS AUTORES REVISADOS.	69
FIGURA 3.1 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO EM MAPA DE BIOMAS BRASILEIROS.	74
FIGURA 3.2 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO EM MAPA CLIMÁTICO DO ESTADO DE SANTA CATARINA CONFORME CLASSIFICAÇÃO DE KOPPEN.....	75

FIGURA 3.3 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO EM MAPA DE DOMÍNIO MORFOCLIMÁTICO DO ESTADO DE SANTA CATARINA CONFORME CLASSIFICAÇÃO DE AB’SÁBER.	75
FIGURA 3.4 – ÁREA DE ESTUDO. REGIÃO DA SERRA DO CORVO BRANCO, CÂNION DO ESPRAIADO, CAMPO DOS PADRES E ADJACÊNCIAS.	76
FIGURA 3.5 – INÍCIO DA DESCIDA DA SERRA DO CORVO BRANCO (A), FACE NOROESTE DE MORRO NA SERRA DO CORVO BRANCO (B) E VISTA NORTE NO ALTOS DO CORVO BRANCO (C).	76
FIGURA 3.6 – RIO CANOAS.	77
FIGURA 3.7 – REGIÃO DO ESPRAIADO, CARACTERIZADO POR ALTAS ALTITUDES E FORMAÇÕES DE CÂNIONS (A), VISTA NORDESTE DA MONTANHA INFINITA (B), INÍCIO DAS TRILHAS (C) E VISTA SUL PARA O CÂNION DO ESPRAIADO (D).	77
FIGURA 3.8 – CACHOEIRA DO RIO DOS BUGRES (A), CACHOEIRA DO RIO BONIN (B) E VISTA OESTE DO CÂNION DO RIO DOS BUGRES (C).	78
FIGURA 3.9 – PRINCIPAIS MATERIAIS EMPREGADOS EM LEVANTAMENTO DE CAMPO: BINÓCULO LELONG LE-2053 (A); DRONE DJI AIR 3 (B); CLINÔMETROS: DE BOLHA HW300 (C), DIGITAL HAGLOF ECII-D (D) E ANALÓGICO (E); E VIATURA FRONTIER DIESEL 4X4 190CV (F).	80
FIGURA 3.10 – DADOS DE TEMPERATURA, PRECIPITAÇÃO, UMIDADE RELATIVA DO AR E VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO DE SÉRIE HISTÓRICA DOS ÚLTIMOS 11 ANOS (2014-2024). RESUMO ESTATÍSTICO (MÉDIA) DOS DADOS COLETADOS PELA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA INMET A845 (BOM JARDIM DA SERRA).	82
FIGURA 3.11 – TEMPERATURA ESPERADA PARA A ÁREA DE ESTUDO, OBTIDA POR MEIO DE SÉRIE HISTÓRICA DE DADOS COLETADOS NO PERÍODO DE 1970 A 2000 (<i>WORLDCLIM</i>).	83
FIGURA 3.12 – PRECIPITAÇÃO NA ÁREA DE ESTUDO OBTIDA POR MEIO DE SÉRIE HISTÓRICA DE DADOS COLETADOS NO PERÍODO DE 1970 A 2000 (<i>WORLDCLIM</i>).	83

FIGURA 3.13 – CAMADA DE INFORMAÇÃO DE HIDROGRAFIA, FORMADA PELOS CURSOS E CORPOS D'ÁGUA PRESENTES NA ÁREA DE ESTUDO.....	84
FIGURA 3.14 – SOLOS PRESENTES NA ÁREA DE ESTUDO.	85
FIGURA 3.15 – RECORTE DE IMAGEM CBERS 04A-WPM FUSIONADA REFERENTE AO MÊS DE FEVEREIRO (ID: CBERS4A_WPM20514820240211).....	87
FIGURA 3.16 – FLUXOGRAMA GERAL DO MÉTODO ADOTADO PARA A ELABORAÇÃO DE MAPAS DE TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS E AUTOMAÇÃO DE ROTAS ENTRE DOIS PONTOS (ORIGEM E DESTINO).....	92
FIGURA 3.17 – VISÃO GERAL DO FLUXO DE PRÉ-PROCESSAMENTO, SEGMENTAÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E DEMAIS PROCESSAMENTOS PARA A OBTENÇÃO DAS CAMADAS DE INFORMAÇÃO DE ENTRADA (<i>INPUTS</i>) DA MCDA.....	93
FIGURA 3.18 – VIA PAVIMENTADA (A) E NÃO PAVIMENTADA (B), CERCA (C) E EDIFICAÇÃO (D).	100
FIGURA 3.19 – VEGETAÇÃO Densa NA ENCOSTA DE MORROS (A) E EM VALE (B).	101
FIGURA 3.20 – PARQUE.....	101
FIGURA 3.21 – VEGETAÇÃO RASTEIRA NATURAL (A) E MANEJADA (B).....	101
FIGURA 3.22 – LAVOURA: CULTIVO DE HORTALIÇAS (A), POMAR (B) E EM FASE DE DESENVOLVIMENTO VEGETATIVO (C).	102
FIGURA 3.23 – SOLO EXPOSTO DA ORDEM DOS ARGISSOLOS (A) E DOS CAMBISSOLOS (B).	102
FIGURA 3.24 – CURSO D'ÁGUA (A) E CORPO D'ÁGUA (B).....	102
FIGURA 3.25 – SOLO COM TEXTURA ARGILOSA (A) E COM ROCHAS AFLORADAS (B).....	104
FIGURA 3.26 – CLASSES DE TIPO DE SOLO COM RESPECTIVAS ZONAS DE TRANSIÇÃO.	106
FIGURA 3.27 – APLICAÇÃO DA LÓGICA <i>FUZZY</i> POR MEIO DE FUNÇÕES LINEARES DECRESCENTES RELATIVA ÀS CLASSES DE SOLO LIMÍTROFES.....	107

FIGURA 3.28 – REPRESENTAÇÃO DOS PNEUS MT (A), AT (B), HT (C) E LAGARTAS (D).	108
FIGURA 3.29 – FLUXO DO AHP PARA A ANÁLISE DA TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS.	110
FIGURA 3.30 – OBJETOS NÃO RECONHECIDOS NAS IMAGENS CBERS 04A-WPM: TRONCO DE ÁRVORE CORTADA AINDA FIXADO ao SOLO (A) E SOLTO NA SUPERFÍCIE (B).	120
FIGURA 3.31 – ROCHA AFLORADA ADEQUADA À TRAFEGABILIDADE (A) E MATAÇÕES IMPEDITIVOS POR SUPERAREM O VÃO LIVRE DO SOLO DE VIATURAS (B).	121
FIGURA 3.32 – SOLO DE TURFA: SECO (A) E ÚMIDO (B).	122
FIGURA 3.33 – CAMINHOS EM ÁREAS DE INFLUÊNCIA DOS RIOS (LEITO SECO), TRAFEGÁVEIS PARTE DO ANO. VISTAS DO RIO CANOAS POR IMAGENS DE DRONE: OBLIQUA OESTE (A), ORTOGONAL (B), ORTOGONAL (C) E OBLIQUA NOROESTE (D).	122
FIGURA 4.1 – CAMADAS DE INFORMAÇÃO DE DECLIVIDADE (A), TWI (B) E TRI (C).	125
FIGURA 4.2 – CAMADA DE USO E COBERTURA DA TERRA COM REGIÕES DE SOMBRAS (A) E FILTRADA DE REGIÕES DE SOMBRA (B).	125
FIGURA 4.3 – CAMADA DE INFORMAÇÃO DE MALHA VIÁRIA E EDIFICAÇÕES.	126
FIGURA 4.4 – CAMADA DE INFORMAÇÃO DE CERCAS E MUROS.	126
FIGURA 4.5 – MAPAS DE TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS, PARA VIATURAS COMUNS DE MERCADO COM PNEU AT, DISPOSTO EM ESCALA CONTÍNUA DE IT VARIANDO DE 0 A 10 (A) E EM ESCALA CATEGÓRICA COM CLASSES DE ADEQUADA A IMPEDITIVA, CONFORME QUEBRA NATURAL DE JENKS (B). MAPAS REFERENTES À ESTAÇÃO DO INVERNO. OS MAPAS DAS OUTRAS ESTAÇÕES DO ANO FORAM APRESENTADOS NO APÊNDICE 2.	127
FIGURA 4.6 – MODELO PARA ELABORAÇÃO DE MAPAS DE TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS DESENVOLVIDO NA PLATAFORMA <i>DINAMICA</i> EGO.	128

FIGURA 4.7 – MODELO DE AUTOMAÇÃO DE ROTAS DESENVOLVIDO NA PLATAFORMA <i>DINAMICA</i> EGO.	130
FIGURA 4.8 – ROTAS AUTOMATIZADAS DADO UM PONTO DE ORIGEM E OUTRO DE DESTINO.	131
FIGURA 4.9 – PONTOS AMOSTRAIS DE VALIDAÇÃO DO USO E COBERTURA DA TERRA.	141
FIGURA 4.10 – PONTOS AMOSTRAIS DE VALIDAÇÃO PARA O MAPA DE TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS.	143
FIGURA 4.11 – COMPARATIVO ENTRE ROTAS RASTREADAS EM CAMPO E ROTAS GERADAS PELO MODELO DE AUTOMAÇÃO DE ROTAS (ROTA PREFERENCIAL).	150

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1.1 – MATRIZ DE AMARRAÇÃO.	28
QUADRO 2.1 – TÉCNICAS DE ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO (MCDA).	34
QUADRO 2.2 – CAMADAS DE INFORMAÇÃO UTILIZADAS EM CADA UM DOS ESTUDOS REVISADOS.	44
QUADRO 2.3 – UTILIZAÇÃO DE MDE DE CARÁTER GLOBAL.	47
QUADRO 2.4 – OBTENÇÃO DE DADOS SOBRE A VEGETAÇÃO POR MEIO DE TÉCNICAS DE CLASSIFICAÇÃO, ÍNDICES ESPECTRAIS E VETORIZAÇÃO MANUAL.....	51
QUADRO 2.5 – INSUMOS PARA A OBTENÇÃO DA CAMADA DE CURSOS E CORPOS D'ÁGUA.	53
QUADRO 2.6 – INSUMOS PARA FORMAÇÃO DA CAMADA DE INFORMAÇÃO DE SOLO.	55
QUADRO 2.7 – ESCALAS DE TRABALHO DOS ESTUDO REVISADOS.	60
QUADRO 2.8 – <i>SOFTWARES</i> E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS ESTUDOS REVISADOS.	62
QUADRO 2.9 – ÁREAS DE ESTUDO EM DIFERENTES PAÍSES UTILIZADAS NOS ESTUDOS REVISADOS, EXCETO AMÉRICA LATINA.	67
QUADRO 2.10 – MÉTODOS DE INFERÊNCIA ESPACIAL EMPREGADOS PARA A INTEGRAÇÃO DE DIFERENTES CAMADAS DE INFORMAÇÃO. ...	68
QUADRO 3.1 – INSUMOS DE LEVANTAMENTOS DE ALTA/ALTÍSSIMA RESOLUÇÃO ESPACIAL.	79
QUADRO 3.2 – NÍVEIS DE PROCESSAMENTO DAS IMAGENS CBERS 04A-WPM.	86
QUADRO 3.3 – DETALHAMENTO DE PRÉ-PROCESSAMENTOS DOS INSUMOS.	94
QUADRO 3.4 – ATRIBUTOS CALCULADOS PARA AS BANDAS ESPECTRAIS DISPONÍVEIS NAS IMAGENS CBERS 04A-WPM E PARA OS ÍNDICES NDVI E NDWI.	99
QUADRO 3.5 – DESCRITIVO DE CLASSES DE USO E COBERTURA DA TERRA DE INTERESSE PARA A TRAFEGABILIDADE.....	100

QUADRO 3.6 – SOLOS DA ÁREA DE ESTUDO E IMPLICAÇÕES NA TRAFEGABILIDADE.....	104
QUADRO 3.7 – TIPOS DE RODADO, INDICAÇÕES DE USO E IMPLICAÇÕES NA TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS.....	108
QUADRO 3.8 – ESCALA FUNDAMENTAL DE SAATY.....	111
QUADRO 4.1 – LOCALIZAÇÃO DO PONTO DE ORIGEM E DE DESTINO. DATUM HORIZONTAL: SIRGAS2000 (ÉPOCA 2000,4); PROJEÇÃO UTM FUSO 22S; EPSG: 31982.....	129
QUADRO 4.2 – MATRIZ DE VALIDAÇÃO DE ROTAS (ROTA PREFERENCIAL). 146	

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – INSUMOS UTILIZADOS NA MODELAGEM DA TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS.	81
TABELA 3.2 – DADOS DAS IMAGENS CBERS 04A-WPM EMPREGADAS NA OBTENÇÃO DA CAMADA DE INFORMAÇÃO DE USO E COBERTURA DA TERRA.....	86
TABELA 3.3 – CAMADA DE INFORMAÇÃO DE DECLIVIDADE, RESPECTIVAS CLASSES E TIPOS DE SUPERFÍCIES DO TERRENO ASSOCIADAS.....	96
TABELA 3.4 – CAMADA DE INFORMAÇÃO DE TWI, RESPECTIVAS CLASSES E TIPOS DE SUPERFÍCIES DO TERRENO ASSOCIADAS.	97
TABELA 3.5 – CAMADA DE INFORMAÇÃO DE TRI, RESPECTIVAS CLASSES E TIPOS DE SUPERFÍCIES DO TERRENO ASSOCIADAS.	97
TABELA 3.6 – MATRIZ DE COMPARAÇÃO AOS PARES.....	111
TABELA 3.7 – VALORES TABELADOS DE ÍNDICE ALEATÓRIO (RI). O RI MÉDIO É DERIVADO DE UMA AMOSTRA DE MATRIZES RECÍPROCAS GERADAS ALEATORIAMENTE USANDO AS ESCALAS 1/9, 1/8, ..., 8 E 9.....	113
TABELA 3.8 – VALORES DAS VARIÁVEIS EMPREGADAS NO EXAME DE CONSISTÊNCIA.	114
TABELA 3.9 – RANQUEAMENTO DE CLASSES. 1: OBSTÁCULOS ABSOLUTAMENTE IMPORTANTES À TRAFEGABILIDADE; 3: OBSTÁCULOS MUITO IMPORTANTES; 5: OBSTÁCULOS IMPORTANTES; 7: OBSTÁCULOS LIGEIRAMENTE IMPORTANTES; 9: OBSTÁCULOS DE PEQUENA IMPORTÂNCIA; 2, 4, 6 E 8: VALORES INTERMEDIÁRIOS DOS JULGAMENTOS.....	115
TABELA 3.10 – INTERVALOS DE ITS PARA CLASSES DE RESTRIÇÕES à TRAFEGABILIDADE PELAS QUEBRAS NATURAIS DE JENKS. ..	117
TABELA 3.11 – CUSTOS ESTABELECIDOS PARA A GERAÇÃO DE TRÊS DIFERENTES SUPERFÍCIES DE CUSTO DE CÁLCULO DAS ROTAS PREFERENCIAL, RAZOÁVEL E DESAFIADORA.	118
TABELA 4.1 – DISTÂNCIAS TOTAIS PERCORRIDAS POR TIPO DE ROTA.	139

TABELA 4.2 – DISTÂNCIAS PERCORRIDAS NAS CLASSES DE RESTRIÇÕES À TRAFEGABILIDADE E NA MALHA VIÁRIA PELAS ROTAS AUTOMATIZADAS.....	139
TABELA 4.3 – MATRIZ DE CONFUSÃO PARA A CAMADA DE USO E COBERTURA DA TERRA. NA COLUNA, FORAM DISPOSTAS AS CLASSES PREDITAS, E NAS LINHAS, A VERDADE DE CAMPO.	142
TABELA 4.4 – PRECISÃO, <i>RECALL</i> , F1-SCORE E KAPPA CONDICIONAL ALCANÇADOS PELAS CLASSES DE USO E COBERTURA DA TERRA.....	142
TABELA 4.5 – MATRIZ DE CONFUSÃO PARA O MAPA DE TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS. NA COLUNA, FORAM DISPOSTAS AS CLASSES PREDITAS, E NAS LINHAS, A VERDADE DE CAMPO.....	143
TABELA 4.6 – PRECISÃO, <i>RECALL</i> , F1-SCORE E KAPPA CONDICIONAL POR CLASSES ALCANÇADOS PARA CADA UMA DAS CLASSES DE RESTRIÇÕES À TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS.	144
TABELA 4.7 – PRECISÃO DA ROTA PREFERENCIAL.....	149
TABELA 4.8 – ERRO POSICIONAL PLANIMÉTRICO ENTRE AS ROTAS AUTOMATIZADAS E AS ROTAS HOMÓLOGAS PERCORRIDAS EM CAMPO.....	150

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

AHP	- Processo Hierárquico Analítico (<i>Analytic Hierarchy Process</i>)
ANA	- Agência Nacional de Águas
CBERS	- Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (<i>China-Brazil Earth Resources Satellite</i>)
DGI	- Divisão de Geração de Imagens
DSG	- Diretoria de Serviço Geográfico
Embrapa	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GEOBIA	- Análise de Imagem Baseada em Objetos Geográficos (<i>Geographic Object-Based Image Analysis</i>)
GNSS	- Sistema Global de Navegação por Satélite (<i>Global Navigation Satellite System</i>)
GPS	- Sistema de Posicionamento Global (<i>Global Positioning System</i>)
IA	- Inteligência Artificial
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	- Índice de Consistência
INMET	- Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IOP	- Índice de Mobilidade (<i>Index of Passability</i>)
IR	- Banda espectral do infravermelho (<i>Infrared</i>)
IT	- Índice de Trafegabilidade
LIDAR	- Detecção e Alcance da Luz (<i>Light Detection and Ranging</i>)
MCDA	- Análise de Decisão Multicritério (<i>Multicriteria Decision Analysis</i>)
MDE	- Modelo Digital de Elevação
MDS	- Modelo Digital de Superfície
MDT	- Modelo Digital do Terreno
MLP	- <i>Perceptron</i> Multicamadas (<i>Multilayer Perceptron</i>)
NASA	- Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (<i>National Aeronautics and Space Administration</i>)
NDVI	- Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>)
NDWI	- Índice de Água por Diferença Normalizada (<i>Normalized Difference Water Index</i>)

NIR	- Banda espectral do infravermelho próximo (<i>Near infrared</i>)
OSM	- Mapa Viário Aberto (<i>OpenStreetMap</i>)
OTAN	- Organização do Tratado do Atlântico Norte
PDI	- Processamento Digital de Imagens
RC	- Razão de Consistência
RF	- Floresta Aleatória (<i>Random Forest</i>)
RGB	- Bandas espectrais do Vermelho, Verde e Azul (<i>Red, Green and Blue</i>)
RI	- Índice Aleatório (<i>Random Index</i>)
SAVI	- Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (<i>Soil-Adjusted Vegetation Index</i>)
SBR	- Sistema Baseado em Regras
SCA	- Área de Captação Específica (<i>Specific Catchment Area</i>)
SE	- Sistema Especialista
SiBCS	- Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SIG	- Sistema de Informações Geográficas
SLIC	- Agrupamento Iterativo Linear Simples (<i>Simple Linear Iterative Clustering</i>)
SMI	- Índice de Umidade do Solo (<i>Soil Moisture Index</i>)
SR	- Sensoriamento Remoto
SRC	- Sistemas de Referência de Coordenadas
SVM	- Máquina de Vetores de Suporte (<i>Support Vector Machine</i>)
SWIR	- Banda espectral do infravermelho de ondas curtas (<i>Short-wave Infrared</i>)
TCA	- Área de Captação Total (<i>Total Catchment Area</i>)
TRI	- Índice Topográfico de Rugosidade (<i>Topographic Ruggedness Index</i>)
TWI	- Índice Topográfico de Umidade (<i>Topographic Wetness Index</i>)
USGS	- Serviço Geológico dos Estados Unidos (<i>United States Geological Survey</i>)
UTM	- Universal Transversa de Mercator (<i>Universal Transverse Mercator</i>)
VANT	- Veículo Aéreo Não Tripulado
VTNT	- Veículo Terrestre Não Tripulado
WMS	- Serviço de Mapa na Rede (<i>Web Map Service</i>)
WPM	- Câmera Multiespectral e Pancromática de Varredura Ampla (<i>Multispectral and Panchromatic Wide-Scan Camera</i>)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 OBJETIVOS	27
1.1.1 Objetivo geral	27
1.1.2 Objetivos específicos.....	27
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	27
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1 TRAFEGABILIDADE	29
2.2 MAPA DE TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS	30
2.3 APRENDIZADO DE MÁQUINA.....	31
2.3.1 Classificador <i>Random Forest</i> (RF)	32
2.3.2 Análise de Imagem Baseada em Objetos Geográficos (GEOBIA)	33
2.4 ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO (MCDA)	33
2.4.1 Processo Hierárquico Analítico (AHP).....	35
2.4.1.1 Etapas de aplicação do AHP	36
2.5 AUTOMAÇÃO DE ROTAS	38
2.5.1 Algoritmo de Dijkstra	39
2.6 REVISÃO DA LITERATURA	40
2.6.1 Camadas de informação	42
2.6.1.1 Relevo/declividade.....	45
2.6.1.1.1 Índice Topográfico de Umidade (TWI)	48
2.6.1.1.2 Índice Topográfico de Rugosidade (TRI)	49
2.6.1.2 Vegetação	50
2.6.1.3 Cursos e corpos d'água	52
2.6.1.4 Solo	54
2.6.1.5 Feições antrópicas.....	57
2.6.1.6 Condições meteorológicas	58
2.6.2 Escala de trabalho.....	59
2.6.3 <i>Softwares</i> e equipamentos	61
2.6.4 Levantamentos de campo	63
2.6.5 Campos de aplicação	64
2.6.6 Tipos de viaturas analisadas	65
2.6.7 Considerações quanto ao recorte espacial	66

2.6.8 Métodos de inferência espacial	68
2.6.9 Formas de apresentação de restrições à trafegabilidade	69
2.6.10 Síntese da revisão	71
3 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO	73
3.1 ÁREA DE ESTUDO	73
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	78
3.2.1 Dados utilizados	78
3.2.1.1 Condições meteorológicas	82
3.2.1.2 Hidrografia	84
3.2.1.3 Tipo de solo	84
3.2.1.4 Imagens CBERS 04A-WPM	85
3.2.2 Plataformas e <i>softwares</i>	87
3.2.3 Procedimentos	88
3.2.4 Processamento de camadas de informação	93
3.2.4.1 Relevo	95
3.2.4.1.1 Declividade	95
3.2.4.1.2 Índice Topográfico de Umidade (TWI)	96
3.2.4.1.3 Índice Topográfico de Rugosidade (TRI)	97
3.2.4.2 Uso e cobertura da terra	97
3.2.4.2.1 Segmentação	98
3.2.4.2.2 Extração de atributos	98
3.2.4.2.3 Definição de classes de interesse para a trafegabilidade	99
3.2.4.2.4 Classificação	103
3.2.4.3 Tipo de solo	103
3.2.4.3.1 Tratamento de incertezas do tipo de solo	105
3.2.5 Tipo de rodado	107
3.2.6 Análise de Decisão Multicritério (MCDA)	108
3.2.6.1 Processo Hierárquico Analítico (AHP)	109
3.2.6.1.1 Matriz de comparação e atribuição de pesos	110
3.2.6.1.2 Exame de consistência	112
3.2.6.1.3 Ranqueamento de classes	114
3.2.6.2 Índice de Trafegabilidade (IT)	116
3.2.7 Transformação para classes de restrições à trafegabilidade	117
3.2.8 Automação de rotas	118

3.2.9 Limitações da modelagem.....	120
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	124
4.1 RESULTADOS INTERMEDIÁRIOS (PROCESSAMENTO DAS CAMADAS) ...	124
4.2 MAPA DE TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS	127
4.3 ROTAS	129
4.4 VALIDAÇÃO	141
4.4.1 Validação da classificação da camada de uso e cobertura da terra.....	141
4.4.2 Validação do mapa de trafegabilidade de viaturas	142
4.4.3 Validação das rotas	145
4.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	151
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	157
REFERÊNCIAS.....	159
APÊNDICE 1 – CÓDIGO PYTHON DO FILTRO DE SOMBRAS (PYQGIS)	176
APÊNDICE 2 – MAPAS DE TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS PARA AS ESTAÇÕES DO VERÃO (A), OUTONO (B) E PRIMAVERA (C)	178
APÊNDICE 3 – PARES DE PONTOS AMOSTRAIS (PPAS) PARA CÁLCULO DO RMSE DE ROTAS AUTOMATIZADAS	179

1 INTRODUÇÃO

Trafegabilidade é um campo interdisciplinar que se concentra na interação entre o terreno e o veículo terrestre automotor – viaturas civis ou militares, máquinas agrícolas, *rovers* etc. – que se desloca sobre sua superfície. Pode-se defini-la como a adequação do terreno para permitir o deslocamento, que depende do tipo de solo, desempenho e características da viatura, declividade, temperatura, precipitação, presença de obstáculos no trajeto etc. (HE *et al.*, 2023).

Quando em deslocamento fora de estrada (*off-road*), a trafegabilidade refere-se a uma ação especial em que não há a utilização de malhas viárias durante todo ou parte do trajeto desde a origem até o destino. Esse tipo de deslocamento pode ser necessário em casos de desastres naturais, conflitos armados ou quando as vias normais de tráfego, principalmente estradas, pontes ou túneis, estiverem danificadas. Por essa razão, e dada a quantidade de variáveis envolvidas, encara-se a trafegabilidade como um fenômeno complexo, de difícil modelagem (HE *et al.*, 2023).

A avaliação da trafegabilidade é altamente significativa para os tomadores de decisão ou para aqueles que necessitem desenvolver planos de ação e reduzir riscos nos itinerários adotados. A procura por maior entendimento sobre esse fenômeno não é atual, o que pode ser constatado por meio do estudo de Knight (1956), que objetivou, durante um período de 10 anos (1946 a 1956), coletar dados e desenvolver técnicas para classificação de solos quanto à trafegabilidade de viaturas utilizadas à época pelas Forças Armadas dos Estados Unidos.

Knight (1956) preocupou-se, ainda, com a forma gráfica de apresentação das condições do terreno aos comandantes militares, que pudesse sintetizar a relação entre a trafegabilidade e o terreno. Visando prever a trafegabilidade em áreas em que não fosse possível a realização de levantamentos de campo prévios, buscou-se o desenvolvimento de métodos para correlacioná-la com fotografias aéreas e dados meteorológicos suficientemente precisos para permitir aos comandantes planejarem os deslocamentos de tropas motorizadas.

Na década de 1960, destaca-se o estudo realizado por Rush (1967), cujo objetivo foi determinar os requisitos mínimos de resistência do solo necessários para suportar duas viaturas específicas com cargas de 9 t e 10 t. Compararam-se os requisitos de resistência determinados experimentalmente com os padrões previstos

em manuais oficiais e promoveu-se uma investigação das inter-relações da trafegabilidade de viaturas sobre rodas e possíveis implicações na resistência do solo.

Esse mesmo autor havia, em anos anteriores, realizado estudos de verificação da trafegabilidade com tipos de solo específicos: orgânicos e minerais de granulometria grossa, para determinar o desempenho da viatura JUMBO, um caminhão M704 4x4 de 5 t (RUSH, 1961); e de granulometria fina e grossa, para determinar as características de desempenho da viatura GOER de 5 t (RUSH, 1962).

Na década de 1970, importantes trabalhos procuraram descrever métodos numéricos para a análise do terreno, de modo a fornecer uma base de avaliação da trafegabilidade de viaturas. Com a maior quantidade de dados disponíveis em relação a décadas anteriores, procurou-se dar maior ênfase às características do terreno, enquanto o desempenho de viaturas específicas assumiu uma menor importância (SCHREIER; LAVKULICH, 1978; SCHREIER; LAVKULICH, 1979).

Nos anos que se seguiram, observou-se a consolidação do Sensoriamento Remoto (SR), que teve grande influência no modo como a trafegabilidade viria a ser tratada e modelada pelos seus estudiosos. O SR pode ser definido como a técnica de se obter dados sobre uma determinada área por meio de equipamentos eletrônicos (sensores remotos) que não estejam em contato direto com essa área (GARCÍA-ÁLVAREZ *et al.*, 2022). Para tanto, utiliza-se a interação entre a radiação eletromagnética refletida ou emitida e posteriormente captada pelos sensores a bordo de satélites, aeronaves, drones etc. (TAO *et al.*, 2023).

Os satélites de SR são uma das fontes de dados mais usada na modelagem do terreno, devido a sua capacidade de coletar dados espaciais multitemporais de grandes extensões territoriais (THIEN; PHUONG, 2023). Com isso, o SR tem sido reconhecido como uma maneira eficaz para a extração de informações da superfície (ALVES *et al.*, 2022), o que pode ser explicado pelas diversas vantagens em comparação com os métodos tradicionais de coleta de dados: cobrem grandes territórios, muitas vezes de menor custo e fornecem uma base precisa de mapeamento do terreno (MELNYK; YACHNIUK, 2022; ZOU *et al.*, 2022).

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), combinados com o SR, o Processamento Digital de Imagem (PDI) e os conhecimentos do analista, auxiliam na aquisição, tratamento e manipulação de dados, visando à obtenção de informações de interesse. Os SIGs têm se mostrado ferramentas úteis para a elaboração de produtos cartográficos aptos a auxiliar os tomadores de decisão em planejamentos e

tomadas de decisões, tendo como vantagens o baixo custo operacional e a capacidade de visualização da informação geográfica (JEDI; JAWARI, 2023).

Entre os dados passíveis de manipulação em SIG, encontram-se os insumos de alta qualidade obtidos por meio de levantamentos aerofotogramétricos com utilização de câmeras métricas. O SR engloba, além do imageamento realizado por sensores a bordo de satélites (orbitais), as imagens adquiridas por aerofotogrametria de elevada altitude (por meio de plataformas aéreas tripuladas e não tripuladas), bem como por aerofotogrametria de curto alcance, esta última incluindo tanto as imagens obtidas a bordo de plataformas não tripuladas de baixa altitude quanto terrestres (USGS, 2018). Em suma, enquanto o SR fornece os dados espaciais, os SIGs promovem a gestão eficiente da informação geográfica (HU *et al.*, 2023).

A partir dessa eficiência dos SIGs, surge um novo paradigma de elaboração de produtos cartográficos, conhecido como cartografia rápida. De acordo com Boitat, Wania e Dalmasso (2020), pode-se defini-la como o processo capaz de fornecer geoinformação, de forma tempestiva, aos tomadores de decisão. Também faz parte desse paradigma cartográfico atual a produção focada no melhor atendimento aos requisitos do usuário, com foco na celeridade da produção de informação geográfica (WANG *et al.*, 2018). Por conseguinte, espera-se que órgãos e entidades orientem a linha de produção cartográfica visando ao cumprimento das demandas no tempo certo (PERRUT; BRITO, 2022).

Entre os instrumentos auxiliares à trafegabilidade que podem ser produzidos no escopo da cartografia rápida, encontram-se os mapas de trafegabilidade de viaturas. Esse produto cartográfico é capaz de fornecer informações sobre áreas trafegáveis, sendo gerado a partir da análise espacial complexa de diferentes variáveis (POKONIECZNY; DAWID, 2023).

Os mapas de trafegabilidade de viaturas permitem a tomada de decisão por meio da análise prévia do terreno que será percorrido. A sua maior aplicabilidade está em áreas sem malha viária ou quando essa necessite de manutenção em virtude de desgaste natural, desastres ou outros fatores que impeçam a trafegabilidade. Por exemplo, em casos de escorregamentos de terra, enchentes e fissuras terrestres que danifiquem as infraestruturas de tráfego (WICANDER, 2018).

Além de apoio ao planejamento e tomada de decisão em nível estratégico, os mapas de trafegabilidade de viaturas podem ser úteis aos motoristas, por permitir uma visão geral do terreno além do que se pode observar da posição da viatura, servindo

como um meio indicativo das melhores áreas a trafegar. Ressalta-se que esses mapas têm grande empregabilidade em ações militares (VELOZA, 2020), mas possuem também importância na área civil, em especial para entidades que necessitem realizar deslocamentos fora de estrada, ainda que esporádicos, como empresas de construção civil, energia, ligadas ao agronegócio, serviços de emergência ou florestais (RADA; RYBANSKY; DOHNAL, 2020; RADA; RYBANSKY; DOHNAL, 2021).

Atualmente, o desenvolvimento de mapas de trafegabilidade de viaturas é tema de interesse para muitos estudiosos da trafegabilidade, que buscam modelar e avaliar o impacto abrangente de suas múltiplas variáveis influentes (HESTERA *et al.*, 2023). Por exemplo, Rybansky (2020) analisou a cobertura vegetal e, mais especificamente, as florestas; a influência do solo na trafegabilidade de viaturas específicas é discutida nos estudos de Cordeiro (2018) e Mattson *et al.* (2023); o impacto das condições meteorológicas é abordado em Pokonieczny (2022); o uso e cobertura da terra em Pokonieczny, Dawid e Wyszzyński (2023); e o relevo em Shcherbakov e Sokolov (2023).

Para a elaboração desses mapas, pode-se adotar uma abordagem com interpretação visual e subjetiva, por meio de classes de restrições à trafegabilidade: inicia-se em terreno adequado, passando-se pelas classes restritivas, indo até a classe impeditiva (KHAN; KASHIF; SHAH, 2021). Não obstante, estudos atuais têm adotado uma abordagem quantitativa, por meio de sistemas baseados em regras, técnicas de decisão multicritério, análises matemáticas e geoestatística (HE *et al.*, 2023).

Diante desse cenário, procurou-se realizar, neste estudo, uma pesquisa para a modelagem das variáveis que se inter-relacionam de forma a lidar com o fenômeno da trafegabilidade e para o desenvolvimento de modelos de elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas e automação de rotas. Espera-se, com isso, prover o auxílio necessário a órgãos e entidades públicas ou privadas no planejamento e na tomada de decisão relativos à trafegabilidade de viaturas, com emprego de um método passível de replicação no meio acadêmico e profissional.

Nesse diapasão, o problema de pesquisa foi assim definido: como desenvolver um método eficaz capaz de prever a trafegabilidade considerando múltiplas variáveis inter-relacionadas, como tipos de solo, condições meteorológicas e declividade do terreno?

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo foi desenvolver um método de elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas e automação de rotas para viaturas com características usuais de emprego em deslocamentos fora de estrada.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste estudo foram:

- a) investigar quais variáveis impactam a trafegabilidade de viaturas;
- b) analisar algoritmos de segmentação e classificação para a extração de classes de interesse à trafegabilidade;
- c) integrar variáveis, por meio de Análise de Decisão Multicritério (*Multicriteria Decision Analysis* – MCDA), para a elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas;
- d) automatizar rotas entre um ponto de origem e outro de destino; e
- e) avaliar o mapa de trafegabilidade de viaturas e as rotas automatizadas.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este estudo foi conduzido com base na produção de dois artigos (um de revisão e um de descrição do experimento), dispostos na forma de capítulos, conforme resumo constante do QUADRO 1.1.

QUADRO 1.1 – MATRIZ DE AMARRAÇÃO.

Capítulo	Problema	Objetivo	Justificativa	Método	Status
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA (Capítulo 2)	Quais são os materiais utilizados e métodos criados para a elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas nos últimos 20 anos?	Verificar o estado da arte na elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas e promover a identificação das principais variáveis de influência no fenômeno, métodos, insumos, <i>softwares</i> e equipamentos utilizados etc.	Necessidade de conhecer o estado da arte na elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas, principais variáveis, insumos, métodos e resultados alcançados pela literatura especializada.	Realizar uma pesquisa ampla dos trabalhos publicados e disponíveis para consulta no <i>Scopus</i> , <i>Google Scholar</i> e <i>Web of Science</i> , em um recorte temporal dos últimos 20 anos, que tiveram como objeto o estudo e a elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas, com uso de PDI, SIG e insumos de SR.	Em revisão (Revista Brasileira de Cartografia – RBC)
DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO (Capítulo 3)	Como conceber um método capaz de prever a trafegabilidade considerando múltiplas variáveis inter-relacionadas?	Desenvolver um método para a elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas e posterior geração automatizada de rotas do tipo origem-destino.	Necessidade de atualização e complementação dos métodos atuais de elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas e automação de rotas, por meio de técnicas de classificação de imagens e de integração de diferentes variáveis inter-relacionadas.	Utilização de segmentadores e classificadores de Inteligência Artificial (IA) e GEOBIA visando à extração de classes de interesse para a trafegabilidade; desenvolvimento de um método baseado em análise de decisão multicritério para a integração de camadas de informação e dados não espacializados; emprego de algoritmo roteador para a automação de rotas de custo mínimo; e validação dos resultados por meio de levantamento de campo e métricas estatísticas.	Em produção

FONTE: Adaptado de Mazzon (1981).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os mapas de trafegabilidade de viaturas são produtos cartográficos que permitem aos usuários verificarem as restrições à trafegabilidade no terreno, com importância fortemente relacionada a áreas que não possuam malhas viárias ou quando essas estejam danificadas. Por exemplo, deslizamentos de encostas, queda de pontes, enchentes ou cheia de rios podem impossibilitar o uso normal de vias. Nesses casos, o deslocamento fora de estrada, por terrenos pouco explorados, pode ser uma opção viável, com o planejamento da rota a ser seguida auxiliado por esses mapas. Este capítulo apresenta os conceitos fundamentais e a base teórica necessários para a compreensão e modelagem da trafegabilidade. Inicialmente, foi realizada uma revisão conceitual sobre os principais tópicos associados ao fenômeno, abordando definições, técnicas e métodos de análise. Em seguida, foram dispostos os resultados da revisão de literatura, na qual foram discutidos os trabalhos acadêmicos que abordaram a elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas, publicados nos últimos 20 anos e disponíveis para consulta no *Scopus*, *Web of Science* e *Google Scholar*. Foram encontrados e analisados um total de 45 estudos (41 internacionais e quatro nacionais). Nesses estudos, verificou-se que a integração, por diferentes métodos de inferência espacial, de camadas de informação sobre o relevo, tipo e umidade do solo, vegetação, curso/corpos d'água, feições antrópicas e condições meteorológicas, em SIGs, torna possível modelar a trafegabilidade, cujos resultados são apresentados em mapas de trafegabilidade de viaturas.

2.1 TRAFEGABILIDADE

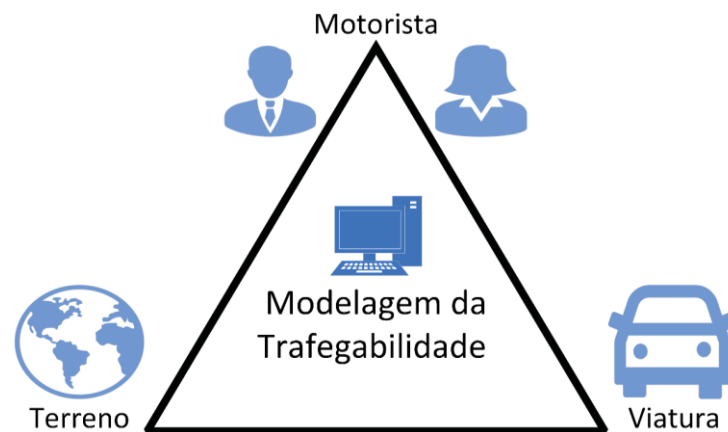
A trafegabilidade pode ser compreendida como a habilidade de uma viatura em se deslocar de um ponto a outro de uma localidade com o objetivo de cumprir uma tarefa designada. Em terrenos naturais, de campo, os estudos sobre o fenômeno se concentram primordialmente no deslocamento fora de estrada, ou seja, sem a utilização da malha viária, sendo uma região considerada inadequada se o terreno for muito restritivo ou impeditivo (HE *et al.*, 2023).

Nesses casos, o maior desafio é determinar o estado final dessas restrições, tendo em mente que há muitas variáveis que interagem entre si. As barreiras para um deslocamento bem-sucedido e seguro são diversas em ambientes extremos e instáveis, em especial pela interação dinâmica entre três grandes componentes modeladores da trafegabilidade (FIGURA 2.1): o motorista, o terreno e a viatura (BRADBURY *et al.*, 2018).

Diante disso, a capacidade das viaturas de percorrer uma rota com sucesso pode não ser totalmente determinada até que estejam em campo. Isso ocorre porque

as viaturas são projetadas, em sua maioria, para trafegar na malha viária, que é construída com materiais que melhoram a drenagem da água e proporcionam maior aderência, com inclinações tão suaves quanto possível e sem obstáculos restritivos ou impeditivos (POKONIECZNY; DAWID, 2023).

FIGURA 2.1 – TRÍADE DOS COMPONENTES MODELADORES DA TRAFEGABILIDADE.



2.2 MAPA DE TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS

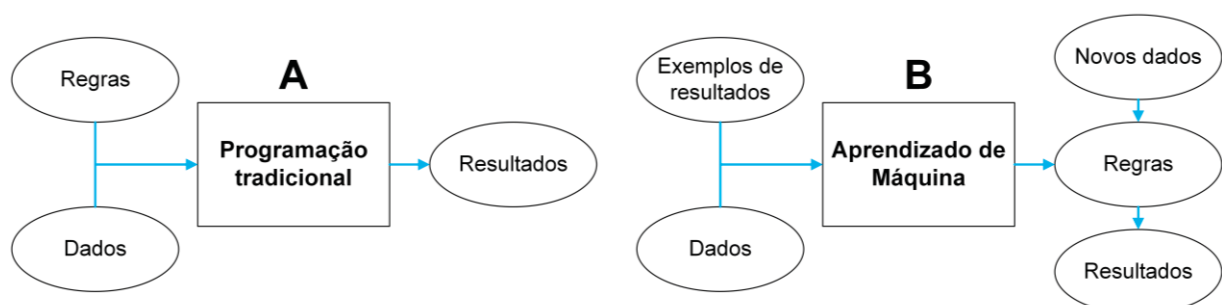
Um primeiro aspecto observado nos estudos publicados sobre a temática é o de não haver uma padronização do nome do produto cartográfico temático neste estudo denominado mapa de trafegabilidade de viaturas. A literatura traz como sinônimos de mapa de trafegabilidade de viaturas: mapa de restrições ao movimento (OLIVEIRA, 2006; PARTIDA, 2017; VELOZA, 2020); mapa de transitabilidade (*passability map*) (POKONIECZNY, 2017; POKONIECZNY, 2018a; POKONIECZNY, 2018b; POKONIECZNY, 2018c; POKONIECZNY, 2022; POKONIECZNY; BORKOWSKA, 2019; POKONIECZNY; DAWID, 2023; POKONIECZNY; MOSCICKA, 2018; POTIC *et al.*, 2024; TORREALBA, 2015); Movimento Através de Campo (*Cross-Country Movement – CCM*) (GROGAN, 2009; HOFMANN *et al.*, 2014; HUBACEK *et al.*, 2016; PIMPA, 2012; PIMPA; SARAPIROME; DASANANDA, 2014; POKONIECZNY; RYBANSKY, 2018; RADA; RYBANSKY; DOHNAL, 2020; RADA; RYBANSKY; DOHNAL, 2021; REHRER; GRIFFIN; RENNER, 2022; RYBANSKY, 2007; RYBANSKY *et al.*, 2014; RYBANSKY *et al.*, 2015; WICANDER, 2018); mapa de mobilidade (*mobility map*) (HUA *et al.*, 2023; HUA *et al.*, 2024); e desempenho de veículo através de campo (*cross-country vehicle performance*) (GUMOS, 2005).

Optou-se aqui pelo uso do termo mapa de trafegabilidade de viaturas (HE *et al.*, 2023; HÖFIG; ARAUJO-JUNIOR, 2015; HUBACEK *et al.*, 2014; KALUGAMUWA; DINUSHA; SANDAMALI, 2020; KHAN; KASHIF; SHAH, 2021; POKONIECZNY; DAWID; BORKOWSKA, 2021; PUNDIR; GARG, 2020a; PUNDIR; GARG, 2020b; PUNDIR; GARG, 2022; SADIYA; JAMES; OLADITI, 2017; SUVINEN, 2006), o qual será utilizado no decorrer deste estudo por ser o nome que, no entendimento deste autor, parece, em língua vernácula, melhor transmitir o sentido desse tipo de produto cartográfico temático. Não obstante, para a revisão da literatura (Seção 2.6), foram utilizados, como palavras-chave de busca dos trabalhos científicos revisados, todos os termos anteriormente citados (mapa de trafegabilidade de viaturas e seus sinônimos).

2.3 APRENDIZADO DE MÁQUINA

Os algoritmos de Aprendizado de Máquina (*Machine Learning*) têm como característica o aumento do desempenho à proporção que recebem mais dados de treinamento. Diferentemente da programação tradicional, em que as regras são preconcebidas e o que se busca são os resultados, no Aprendizado de Máquina entra-se com dados e exemplos de resultados, permitindo que o computador gere as regras do modelo matemático capazes de identificar padrões (FIGURA 2.2). Para o aprendizado e melhoria da eficácia das regras, deve-se fornecer uma quantidade suficiente de dados e resultados esperados no treinamento do algoritmo. Após, chega-se à fase da inferência, em que as regras aprendidas são utilizadas para classificar toda a área de estudo (SANDOVAL; FLORES; MUNIR, 2023).

FIGURA 2.2 – FLUXO GENÉRICO DA PROGRAMAÇÃO TRADICIONAL (A) E DO APRENDIZADO DE MÁQUINA (B).



2.3.1 Classificador *Random Forest* (RF)

A Floresta Aleatória (*Random Forest* – RF) é um classificador aplicável no Aprendizado de Máquina, que faz uso de Árvores de Decisão unidas de forma aleatória a fim de melhorar a acurácia do modelo. Esse algoritmo pode resolver problemas de classificação por meio de combinações de atributos extraídos de conjuntos amostrais (PHAN; KUCH; LEHNERT, 2020) e lidar com dados não lineares de muitas dimensões, sendo amplamente utilizado na classificação de imagens de alta/altíssima resolução espacial (ZHANG *et al.*, 2020).

Suas origens remontam à década de 1980, quando Breiman *et al.* (1984) desenvolveram a Árvore de Decisão, que revolucionou os processos de classificação ao reduzir o esforço computacional necessário com o uso de outras técnicas. Entre 1990 e 2001, Breiman combinou as Árvores de Decisão de modo a formar um novo classificador conhecido como RF (BREIMAN, 1996; BREIMAN, 2001).

No RF, as classes são rotuladas por meio dos resultados de muitas Árvores de Decisão, superando as limitações do classificador de Árvore de Decisão única. Para tanto, faz uso de aprendizado de conjunto (*ensemble*, do tipo *bagging*) e votação por maioria, sendo capaz de lidar com um número maior de variáveis (OUMA *et al.*, 2023).

Destaca-se sua forte adaptabilidade, não sofrendo facilmente com o sobreajuste (*overfitting*) e com boa tolerância a valores atípicos (*outliers*) (WEI *et al.*, 2023). Em geral, cada uma das Árvores de Decisão apresenta baixo viés e alta variância. Ao aumentar o número de árvores trabalhando em conjunto, a variância é reduzida, tornando-se um modelo otimizado para lidar com novas entradas de dados. Assim, permite melhorar a qualidade da classificação de imagens, podendo gerenciar muitos atributos sem afetar a exatidão global do modelo (BHAVANA *et al.*, 2023).

Entre os estudos recentes que empregaram o RF, destacam-se os que se destinaram a verificar as mudanças no uso e cobertura da terra (GIDEY; MHANGARA, 2023); mapear plantações, verificando-se que a acurácia do RF foi melhor do que outros classificadores (ZHEN *et al.*, 2023); e comparar a acurácia de quatro diferentes algoritmos no mapeamento de uso e cobertura da terra, em que a acurácia do RF foi superior à da Máquina de Vetores de Suporte (*Support Vector Machine* – SVM), do K-Vizinhos Mais Próximos (*K-Nearest Neighbors* – KNN) e do Modelo de Mistura Gaussiana (*Gaussian Mix Models* – GMM) (AIGBOKHAN *et al.*, 2022).

2.3.2 Análise de Imagem Baseada em Objetos Geográficos (GEOBIA)

Com a crescente melhoria na resolução espacial das imagens de SR, objetos geográficos têm sido utilizados como unidades básicas para o armazenamento, manipulação e análise das informações geográficas. Classificadores como o RF podem ser treinados por meio de conjuntos amostrais obtidos da Análise de Imagem Baseada em Objetos Geográficos (*Geographic Object-Based Image Analysis – GEOBIA*), com possibilidade de emprego de atributos espectrais, de forma, de textura e características de contexto dos objetos presentes na cena (WU *et al.*, 2021).

Por conseguinte, o GEOBIA tem se destacado como uma alternativa eficiente aos métodos tradicionais de classificação baseados em *pixels*, especialmente em imagens de alta/altíssima resolução espacial. A aplicação de métodos baseados em *pixels* nesses tipos de imagens pode gerar ruídos do tipo “sal e pimenta” (*salt and pepper*), sendo o GEOBIA uma solução eficaz para mitigá-los (WU *et al.*, 2021).

2.4 ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO (MCDA)

A MCDA é um campo interdisciplinar que engloba uma variedade de técnicas – algumas das quais foram apresentadas no QUADRO 2.1 – que ajudam na organização e resolução de problemas que necessitem de análise, priorização e seleção de soluções com diversos critérios inter-relacionados. Essas técnicas auxiliam na tomada de decisão, pois avaliam as alternativas sob várias perspectivas com base nas preferências dos tomadores de decisão (SILVA, 2020).

A escolha da técnica mais adequada depende das características do problema e do nível de subjetividade envolvido no processo decisório. As técnicas baseadas em atribuição de pesos, como a Ponderação Simples (*Equal Weighting*), Ponderação Direta (*Direct Weighting*), Soma do Posto (*Rank Sum*) e Recíproco do Posto (*Rank Reciprocal*), são frequentemente utilizadas quando há conhecimento prévio sobre a importância relativa dos critérios. Por seu turno, as técnicas mais sofisticadas, como o Processo Hierárquico Analítico (*Analytic Hierarchy Process – AHP*) e a Média Ponderada Ordenada (*Ordered Weighted Averaging – OWA*), permitem modelagens mais robustas e detalhadas, incorporando diferentes níveis de compensação entre os critérios avaliados (SAATY, 1990).

QUADRO 2.1 – TÉCNICAS DE ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO (MCDA).

Autor(es)	Técnica	Visão geral de aplicação na análise da trafegabilidade
-	Ponderação Simples	Todos as camadas de informação recebem o mesmo peso, sendo usada quando não há informação suficiente para diferenciar a importância entre elas.
	Ponderação Direta	Atribuição de pesos diretamente a cada camada de informação com base na percepção do(s) especialista(s) da importância relativa entre elas.
Stillwell, Seaver e Edwards (1981)	Soma do Posto ¹	Ordenação das camadas por importância; atribuição de postos às camadas na ordem de importância; e cálculo dos pesos relativos para cada camada.
	Recíproco do Posto ¹	Ordenação das camadas por importância; calcula-se o recíproco (1 dividido pelo posto) para cada camada; soma-se os recíprocos dos postos; e divide-se o recíproco do posto de cada camada pela soma dos recíprocos.
Saaty (1990)	AHP	Técnica utilizada neste estudo (Subseção 2.4.1).
Yager (1988)	OWA	Ordenação dos valores das camadas de informação; atribuição de pesos aos valores ordenados conforme a estratégia de compensação; e integração ponderada das camadas.

Nota¹: O posto refere-se à posição ordinal atribuída a uma camada dentro de um conjunto ordenado da maior para a menor importância. Assim, o posto de cada camada representa essa classificação, sendo 1 atribuído à camada mais importante, dois à segunda camada mais importante, e assim por diante até que todas as camadas tenham sido ordenadas em ordem de importância para a modelagem.

A tomada de decisão é uma tarefa desafiadora, devido à complexidade inerente aos problemas que precisam de soluções coerentes. Nesse contexto, as técnicas de MCDA têm grande relevância ao possibilitar o tratamento de problemas complexos com maior clareza e transparência na modelagem e nos resultados obtidos. Para tanto, soluções variadas podem ser encontradas e estruturadas na MCDA por um ou mais especialistas com base em seu(s) conhecimento(s) sobre o objeto de estudo. O especialista é o responsável pelo processo decisório e pela solução do problema, por meio de sua competência e experiência na análise das variáveis disponíveis para a tomada de decisão (PIMENTA *et al.*, 2019).

Atualmente, a MCDA é amplamente utilizada em diversas áreas do conhecimento para apoiar processos de decisão complexos, nos quais múltiplos critérios precisam ser considerados simultaneamente. Uma de suas principais vantagens é permitir uma estruturação sistemática do problema, proporcionando maior transparência na escolha das melhores alternativas e facilitando a justificativa das decisões tomadas. Isso é especialmente relevante em contextos como planejamento energético (IGHRAVWE; OLANREWAJU, 2025), gerenciamento de resíduos (CONVERTINO *et al.*, 2025), proteção ambiental (WANG; SHAFIEEZADEH,

2025) e identificação de melhores locais para a coleta de água de chuva (HASSAN; MAHDI; KADHIM, 2025), onde diferentes fatores influenciam a decisão final.

Para informações geográficas, a MCDA pode ser definida como um processo que converte e integra camadas por meio dos julgamentos de especialista(s), tendo como resultado um mapa com as informações necessárias à tomada de decisão. Nessa integração, voltada à análise da trafegabilidade, faz-se necessária a atribuição de pesos relativos entre as diferentes camadas de informação e dados não espacializados influentes no fenômeno e o ranqueamento de suas classes (HE *et al.*, 2023). Para tanto, podem-se utilizar diferentes técnicas, entre elas, o AHP.

2.4.1 Processo Hierárquico Analítico (AHP)

O AHP é uma das técnicas de MCDA que permite calcular a relação entre as variáveis influenciadoras de um fenômeno por meio da ponderação, facilitando a avaliação da contribuição e a integração dessas variáveis (AHMED *et al.*, 2024). Para tanto, realiza uma análise matemática de comparações pareadas entre variáveis, com julgamentos e pesos atribuídos por especialista(s) (DUTTA; BANERJEE; RAY, 2024).

Essa técnica tem a capacidade de dividir um problema complexo em componentes simples, resolver cada componente e resumi-los até que se alcance o resultado esperado (SUBBARAYAN *et al.*, 2024). O AHP pode ser usado, por exemplo, para fornecer uma estrutura para a tomada de decisão, considerando vários critérios, enquanto prioriza, seleciona e quantifica escolhas (SAATY, 1977; SAATY, 1980; SAATY, 1987).

Para lidar com problemas complexos e realizar julgamentos criteriosos, o AHP deve ser repetidamente aplicado. Um aspecto que o diferencia é a sua flexibilidade por permitir revisões sucessivas por meio de iterações, de modo que os especialistas possam tanto expandir as variáveis usadas para a resolução do problema quanto ajustar os julgamentos realizados. Assim, cada iteração leva a uma melhoria contínua e, por conseguinte, a uma compreensão mais precisa do fenômeno em análise (SAATY, 1990).

A validação da consistência dos julgamentos é realizada por meio do cálculo da Razão de Consistência (RC), que visa garantir que o modelo é confiável e convincente. A importância da verificação de consistência está na asseguuração da validade dos pesos obtidos para as camadas de informação e dados não

especializados, uma vez que eles só podem ser considerados válidos se adquiridos de uma matriz de comparação consistente (HASANZAEH *et al.*, 2024).

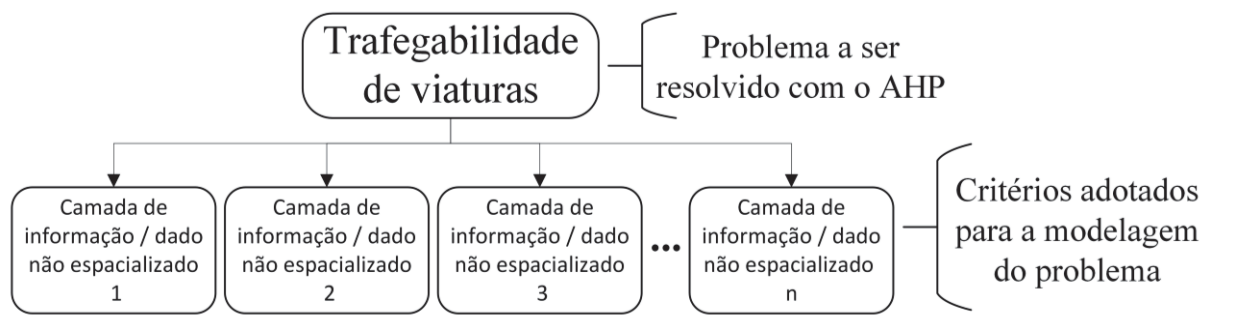
Quando a matriz de comparação é completamente consistente, o RC é igual a zero; se o valor de RC for diferente de zero, mas menor ou igual a 10%, a consistência é aceitável; e se a RC for maior que 10%, a consistência é inaceitável, os resultados não confiáveis e os julgamentos precisam ser revistos. Neste último caso, a inconsistência dos julgamentos conduz o especialista a aperfeiçoar as comparações realizadas (OZEGIN; ILUGBO; ADEBO, 2024).

2.4.1.1 Etapas de aplicação do AHP

Saaty (2001) descreve as etapas de aplicação do AHP, que podem ser resumidas em quatro quando aplicadas à trefegabilidade:

a) Estruturação e representação hierárquica do problema (FIGURA 2.3);

FIGURA 2.3 – REPRESENTAÇÃO HIERÁRQUICA DO AHP PARA A ANÁLISE DA TRAFEGABILIDADE.



b) Comparações aos pares realizadas pelo(s) especialista(s), dispostas na matriz de comparação (A – Eq. (1)) quadrada ($n \times n$), recíproca – uma vez que as comparações devem respeitar a condição de reciprocidade dada pela Eq. (2) – e consistente, considerando-se que as comparações devem igualmente respeitar¹ a condição de transitividade dada pela Eq. (3) (SAATY, 2003);

¹ Destaca-se que a condição de transitividade, ainda que altamente desejável, nem sempre é satisfeita em sua plenitude na aplicação do AHP em problemas do mundo real, visto que dependerá em grande medida da coerência dos julgamentos realizados pelo(s) especialista(s).

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{n1} & \cdots & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}, \quad (2)$$

$$a_{ik} = a_{ij} \cdot a_{jk} \quad \forall i, j, k = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

em que a_{ij} , a_{ji} , a_{ik} e a_{jk} são as comparações aos pares dispostas na matriz de comparação (A) e n é a quantidade de camadas de informação e dados não espacializados comparados (dimensão da matriz de comparação A).

c) Emprego de autovetores e autovalores na estimativa do vetor peso (W – Eq. (4)) (SAATY, 2003); e

$$W = \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix}, \quad (4)$$

em que w_1 a w_n são os pesos relativos de cada uma das camadas de informação e dados não espacializados comparados aos pares. Neste estudo, o cálculo dos pesos relativos foi descrito na Subseção 3.2.6.1.1.

d) Análise de consistência dos julgamentos realizados. Para tanto, Saaty (2003) parte da premissa de uma matriz de comparação aos pares plenamente consistente. Nesse caso, o vetor peso (W) é um autovetor da matriz A , obtido da solução da Eq. (5), sendo o seu autovalor associado, λ_{max} , conhecido como autovalor máximo (ou principal) da matriz de comparação A .

$$AW = \lambda_{max}W \quad (5)$$

Se a matriz de comparação A for plenamente consistente, todas as suas linhas serão combinações lineares da primeira linha e, por conseguinte, todos os n autovalores da matriz de comparação A serão iguais a zero, exceto o autovalor máximo λ_{max} . Nesse caso particular, λ_{max} será igual a n (SAATY, 2003). Não obstante, ao lidar com problemas do mundo real, com matrizes de comparação que raramente atingem a plenitude da consistência, tem-se que o autovalor λ_{max} será um valor maior

que n . Quanto mais próximo λ_{\max} estiver do valor de n , maior a consistência da matriz de comparação A .

Neste estudo, após os pesos relativos serem obtidos pelo AHP e considerados consistentes por meio do exame de consistência (apresentado na Subseção 3.2.6.1.2), foi realizada a integração das camadas e dados não espacializados com emprego do Índice de Trafegabilidade (IT) descrito na Subseção 3.2.6.2.

2.5 AUTOMAÇÃO DE ROTAS

A automação de rotas está intimamente ligada à busca de caminhos ótimos entre uma origem e um destino, onde uma viatura possa se mover com segurança. Ao contrário de deslocamentos sobre a malha viária, em ambientes fora de estrada exige-se automação avançada de rotas, por se tratar de tráfego em terrenos complexos (QIU *et al.*, 2024).

Os métodos de automação de rotas podem ser divididos em duas categorias principais: planejamento de caminho local (*local path planning*) e planejamento de caminho global (*global path planning*). O primeiro otimiza o caminho em tempo real, de acordo com as informações coletadas *in loco* por sensores. Assim, envolve o deslocamento em ambientes dinâmicos ou desconhecidos, onde os algoritmos se adaptam aos obstáculos presentes na cena (YIN *et al.*, 2024).

Por seu turno, o planejamento de caminho global identifica caminhos para quaisquer pontos de origem e de destino com base nas informações preexistentes dispostas em um mapa de custo. Ou seja, gera-se um caminho completo antes mesmo que o deslocamento efetivamente aconteça. Para viaturas, normalmente esse mapa de custo é derivado de um mapa de trafegabilidade por meio da atribuição de custos a cada uma das células desse mapa (CUI *et al.*, 2024). Entre os algoritmos utilizados nesse tipo de automação de rotas, um dos mais conhecidos é o de Dijkstra (KATONA; NEAMAH; KORONDI, 2024).

2.5.1 Algoritmo de Dijkstra

Edsger Dijkstra criou um dos primeiros roteadores baseado no custo de deslocamento entre duas células adjacentes. O algoritmo encontra a rota de menor custo entre a origem e o destino em um grafo (conjunto de nós e arestas) (DIJKSTRA, 1959). Para mapas, a partir do ponto de origem, procura-se a célula adjacente com o menor custo, sendo o processo repetido até que o ponto de destino seja alcançado. Esse processo se desenvolve sobre um mapa de custos, em que são atribuídos custos específicos a cada célula por meio de uma função de custo (LIU *et al.*, 2024).

O algoritmo funciona exaustiva e iterativamente, selecionando a célula com o menor custo acumulado desde a origem e o atualiza, até que a rota de menor custo seja encontrada (JOVANOVIĆ *et al.*, 2024; ZHOU *et al.*, 2024). Logo, possui uma alta eficácia uma vez que todas as células são testadas para a solução da rota de menor custo (LIN, 2024; SHEKHAR *et al.*, 2024). A formulação matemática subjacente do algoritmo segue a relação condicional da Eq. (6) e Eq. (7) (MIYOMBO *et al.*, 2024).

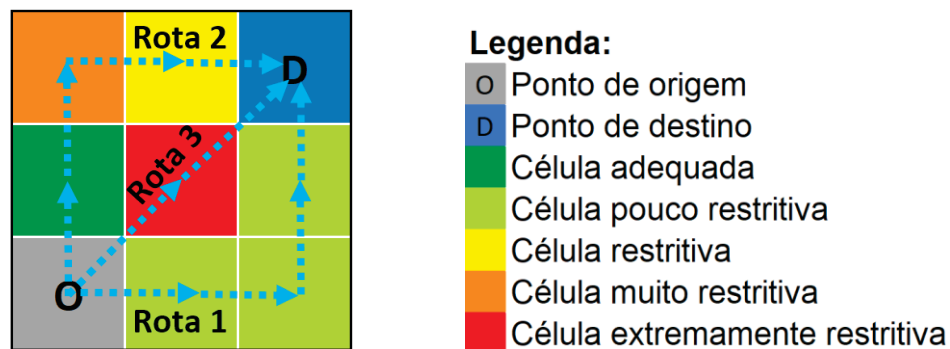
$$\text{Se } d(v) > d(u) + c(u, v) , \quad (6)$$

$$\text{Então } d(v) = d(u) + c(u, v) , \quad (7)$$

em que $c(u, v)$ é o custo de deslocamento de u (célula ocupada) para v (célula adjacente), $d(u)$ é o custo acumulado em u e $d(v)$ é o custo acumulado em v .

A aplicação desse algoritmo sobre os mapas de trafegabilidade de viaturas permite obter rotas de menor custo, a depender do custo que seja estabelecido para cada uma das classes de restrição à trafegabilidade. Por exemplo, levando-se em conta o esquema disposto na FIGURA 2.4, pode-se estabelecer (empiricamente) o custo um para a célula adequada, dois para a célula pouco restritiva, três para a célula restritiva, quatro para a célula muito restritiva e 10 para célula extremamente restritiva. Nesse caso, verifica-se que a rota 1 terá um custo de deslocamento de seis, pois terá que atravessar três células pouco restritivas. A rota 2 terá um custo de deslocamento de oito (célula adequada, restritiva e muito restritiva). Por sua vez, a rota 3 terá um custo de deslocamento de 10 por apresentar uma célula extremamente restritiva. Por conseguinte, verifica-se que o algoritmo de Dijkstra retornará a rota de menor custo, que nesse exemplo, pelos custos atribuídos às diferentes classes de restrição à trafegabilidade, será a rota 1.

FIGURA 2.4 – ALGORITMO DE DIJKSTRA APLICADO EM MAPAS DE TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS PARA BUSCA DA ROTA DE MENOR CUSTO.



2.6 REVISÃO DA LITERATURA

Nesta seção, foram dispostos os estudos publicados, disponíveis para consulta no *Scopus*, *Web of Science* e *Google Scholar*, que tiveram como objeto a elaboração de mapas de tráfegabilidade de viaturas, referentes ao período de 1º de janeiro de 2004 a 15 de outubro de 2024. Buscou-se apresentar as premissas, objetivos, problemas, materiais, métodos e principais características desses estudos.

Por meio de um recorte temporal de um pouco mais de 20 anos, tentou-se abarcar os trabalhos que ainda possuem relevância e capacidade de contribuição suficiente para influenciar os futuros estudos sobre a tráfegabilidade. Foram encontrados um total de 45 estudos, sendo publicações na forma de artigos (24 exemplares), dissertações de nível mestrado (seis exemplares), tese de doutorado (um exemplar), artigos apresentados em eventos (13 exemplares) e relatório técnico (um exemplar). Os autores desses estudos tiveram como objetivos principais:

a) identificar zonas no terreno onde as unidades militares pudessem realizar deslocamentos, em áreas adequadas, restritivas ou impeditivas, com uso de um conjunto de dados obtidos por SR e emprego de SIGs (FLORES; ENTEKHABI; BRAS, 2014; HESTERA; PAHERNIK, 2018; KALUGAMUWA; DINUSHA; SANDAMALI, 2020; KHAN; KASHIF; SHAH, 2021; OLIVEIRA, 2006; PARTIDA, 2017; POKONIECZNY, 2017; POKONIECZNY, 2018b; RYBANSKY, 2007; WICANDER, 2018);

b) analisar a declividade do terreno em área de estudo no Paraná e verificar a potencialidade à mecanização agrícola (HÖFIG; ARAUJO-JUNIOR, 2015);

c) analisar informações sobre o terreno obtidas de imagens de satélite, levantamento aerofotogramétrico e outros insumos de SR, visando à elaboração de mapas de trafegabilidade (GUMOS, 2005; SADIYA; JAMES; OLADITI, 2017);

d) desenvolver um método para o mapeamento e identificação de zonas de trafegabilidade, por meio de uma abordagem semiautomatizada de criação de mapas (GROGAN, 2009; POKONIECZNY, 2020; PUNDIR; GARG, 2020a);

e) analisar e desenvolver mapas de trafegabilidade para Veículos Terrestres Não Tripulados (VTNT) (POKONIECZNY; RYBANSKY, 2018);

f) desenvolver e testar modelos para previsão da trafegabilidade (HOFMANN *et al.*, 2014; PIMPA; SARAPIROME; DASANANDA, 2014; POKONIECZNY, 2018c; POKONIECZNY, 2022; POKONIECZNY; DAWID, 2023; POKONIECZNY; DAWID; BORKOWSKA, 2021; POKONIECZNY; MOSCICKA, 2018; POTIC *et al.*, 2024; PUNDIR; GARG, 2022; RYBANSKY *et al.*, 2014; RYBANSKY *et al.*, 2015; SUVINEN, 2006);

g) propor um sistema baseado em regras, conhecido como Sistema Especialista (SE), para otimizar a avaliação da trafegabilidade pelos comandantes militares (GRANDJEAN; ANGELLIAUME, 2009; PUNDIR; GARG, 2020b; PUNDIR; GARG, 2021; TORREALBA, 2015);

h) demonstrar a possibilidade de uso de um banco de dados de solos e dos resultados de medições penetrométricas para a averiguação da trafegabilidade do solo e criação de mapas de trafegabilidade (HUBACEK *et al.*, 2014);

i) apresentar uma opção digital para a operacionalização do Processo de Integração do Terreno, Condições meteorológicas, Inimigos e Considerações civis (PITCIC), adotado pelo Exército Brasileiro, por meio do desenvolvimento de método para elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas militares (VELOZA, 2020);

j) desenvolver um método para a elaboração de mapas de trafegabilidade com uso de dados espaciais de alta resolução espacial (POKONIECZNY; BORKOWSKA, 2019) e VTNT (HUA *et al.*, 2023; HUA *et al.*, 2024) e para auxiliar a tomada de decisão dos comandantes militares e de serviços de emergência (HUBACEK *et al.*, 2016);

k) demonstrar a viabilidade de uma Rede Triangular Irregular (TIN) como um meio mais eficiente e abrangente para armazenar dados e elaborar mapas de trafegabilidade de viaturas (REHRER; GRIFFIN; RENNER, 2022);

l) determinar a influência da qualidade dos bancos de dados florestais na elaboração de mapas de trafegabilidade (RADA; RYBANSKY; DOHNAL, 2020);

m) desenvolver um sistema de localização automática de rotas nos mapas de trafegabilidade de viaturas em manobras de combate (PIMPA, 2012);

n) determinar a disponibilidade e qualidade geral dos dados e informações sobre o terreno e verificar a adequação dos métodos atuais mais frequentemente empregados para o processamento de informações, análises e elaboração de mapas de trafegabilidade (RADA; RYBANSKY; DOHNAL, 2021); e

o) analisar bancos de dados espaciais de fatores ambientais, geográficos e geológicos voltados à classificação da trafegabilidade para o cumprimento de objetivos militares (HE *et al.*, 2023; POKONIECZNY, 2018a).

2.6.1 Camadas de informação

Esta subseção visou apresentar as camadas de informação utilizadas e que compuseram o mapa de trafegabilidade de viaturas de cada estudo revisado. Normalmente, os elementos naturais e antrópicos observados na elaboração desses mapas incluem, mas não estão restritos às seguintes variáveis (FIGURA 2.5):

a) condições meteorológicas – precipitação, temperatura, umidade relativa do ar e velocidade média do vento;

b) relevo – declividade (variável de 0° a 90°) e índices topográficos;

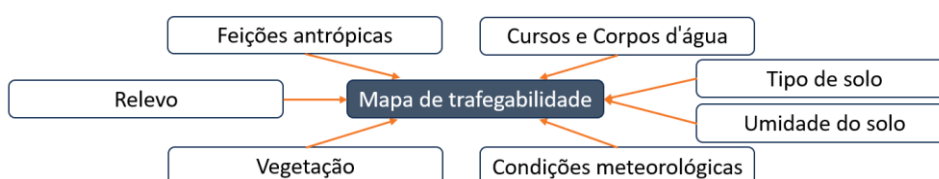
c) cursos e corpos d'água – rios, córregos, lagos, lagoas, reservatórios, piscicultura e demais corpos hídricos naturais ou artificiais;

d) solo – tipos de solo e características que influenciam a sua capacidade de drenagem e, consequentemente, a retenção de umidade;

e) vegetação – florestas, campos, pastagens, silvicultura, lavouras e demais áreas de cultivo; e

f) feições antrópicas – construções civis, áreas edificadas, pontes, túneis, vias, arruamentos, cercas e muros etc.

FIGURA 2.5 – CAMADAS DE INFORMAÇÃO COMUNS NA ELABORAÇÃO DE MAPAS DE TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS.



As camadas de informação dispostas na FIGURA 2.5 podem ser agrupadas em dois grupos: o dos fatores dinâmicos – englobam a umidade do solo, as condições meteorológicas e os cursos d'água; e o dos fatores estáticos – englobam os corpos d'água, o relevo, as feições antrópicas e a vegetação. Ressalta-se que essa classificação é válida no curto e médio prazo, uma vez que a longo prazo todos esses fatores se tornam dinâmicos, devido aos eventos naturais e à capacidade humana de alterar significativamente o ambiente em que vivemos. Como exemplos dessas alterações no longo prazo, podem ser citadas as obras de corte e aterro (alteração do relevo), edificações e construção de rodovias (alteração das feições antrópicas), desflorestamentos (alteração da vegetação) e construção de barragens (alteração de corpos d'água).

Ressalta-se que, além das camadas de informação usuais (FIGURA 2.5), Hubacek *et al.* (2016) destacaram como importantes para a avaliação da trafegabilidade: as características da viatura (massa, pressão dos pneus, tração, dimensões, tipo de chassi – longarina ou monobloco –, ângulo de ataque, vão livre do solo, inclinação frontal ou lateral e potência do motor); mecanismos de rodagem específicos (tipo e quantidade de pneus); fatores técnicos (condição de uso da viatura); fatores pessoais (habilidade do motorista); e características da atividade (tempo de paz ou de guerra). Por seu turno, He *et al.* (2023) propõem a utilização de informações extras referentes a fatores geológicos, como riscos de desastres, tipo de rocha presente nas camadas internas do solo e altitude local.

De acordo com a disponibilidade de insumos e abordagens metodológicas adotadas, os estudos revisados empregaram diferentes camadas de informação nas respectivas modelagens e elaboração dos mapas de trafegabilidade de viaturas. Essas camadas podem ser verificadas, por estudo revisado, no QUADRO 2.2.

QUADRO 2.2 – CAMADAS DE INFORMAÇÃO UTILIZADAS EM CADA UM DOS ESTUDOS REVISADOS.

Autor(es)	Relevô	Tipo de solo	Umidade do solo	Vegetação	Condições meteorológicas	Cursos e corpos d'água	Feições antrópicas
Flores, Entekhabi e Bras (2014)	✓	✓	✓	✓	-	✓	-
Grandjean e Angelliaume (2009)	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓
Grogan (2009)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
Gumos (2005)	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓
He <i>et al.</i> (2023)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Hestera e Pahernik (2018)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Höfig e Araujo-Junior (2015)	✓	✓	✓	-	-	-	-
Hofmann <i>et al.</i> (2014)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Hua <i>et al.</i> (2023)	✓	✓	-	✓	-	✓	✓
Hua <i>et al.</i> (2024)	✓	✓	-	✓	-	✓	✓
Hubacek <i>et al.</i> (2014)	-	✓	✓	-	✓	-	-
Hubacek <i>et al.</i> (2016)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Kalugamuwa, Dinusha e Sandamali (2020)	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓
Khan, Kashif e Shah (2021)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Oliveira (2006)	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓
Partida (2017)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
Pimpa (2012)	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓
Pimpa, Sarapirome e Dasananda (2014)	✓	✓	-	✓	-	✓	✓
Pokonieczny (2017)	✓	✓	-	✓	-	✓	✓
Pokonieczny (2018a)	✓	✓	-	✓	-	✓	✓
Pokonieczny (2018b)	✓	-	-	✓	-	✓	✓
Pokonieczny (2018c)	✓	-	-	✓	-	✓	✓
Pokonieczny (2020)	✓	-	-	✓	-	✓	✓
Pokonieczny (2022)	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓
Pokonieczny e Borkowska (2019)	✓	✓	-	✓	-	✓	✓
Pokonieczny e Dawid (2023)	✓	-	-	✓	-	✓	✓
Pokonieczny, Dawid e Borkowska (2021)	✓	-	-	✓	-	✓	✓
Pokonieczny e Moscicka (2018)	✓	-	-	✓	-	✓	✓
Pokonieczny e Rybansky (2018)	✓	-	-	✓	-	✓	✓
Potic <i>et al.</i> (2024)	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓
Pundir e Garg (2020a)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pundir e Garg (2020b)	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓
Pundir e Garg (2021)	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓
Pundir e Garg (2022)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
Rada, Rybansky e Dohnal (2020)	✓	-	-	✓	-	-	-
Rada, Rybansky e Dohnal (2021)	✓	✓	-	✓	-	✓	-
Rehrer, Griffin e Renner (2022)	✓	✓	✓	✓	-	-	-
Rybansky (2007)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Rybansky <i>et al.</i> (2014)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Rybansky <i>et al.</i> (2015)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Sadiya, James e Oladiti (2017)	✓	✓	-	✓	-	✓	✓
Suvinen (2006)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Torrealba (2015)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Veloza (2020)	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓
Wicander (2018)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Como pode ser observado na FIGURA 2.6, a camada de informação de relevo apareceu em quase 98% dos trabalhos revisados, destacando-se perante as demais camadas. As camadas de vegetação e curso/corpos d'água também estiveram presentes na maior parte dos estudos (respectivamente, 95,55% e 91,11%). As camadas de tipo de solo e feições antrópicas, ainda que não sejam camadas de maior destaque, foram utilizadas, respectivamente, em 82,22% e 80%, o que permite supor uma certa importância dada para o emprego dessas camadas. A utilização da camada de umidade do solo em 27 dos 45 estudos revisados (60%) permite inferir que, não obstante a sua importância na trafegabilidade, foi negligenciada em uma quantidade considerável dos estudos revisados (40%). Por fim, as condições meteorológicas, ainda que sejam de grande importância prática para a previsão da trafegabilidade, foi empregada em menos da metade dos estudos (40%), o que demonstra uma menor importância dada por parte dos autores a essa camada.

FIGURA 2.6 – QUANTIDADE DE VEZES EM QUE CADA CAMADA DE INFORMAÇÃO FOI UTILIZADA NOS ESTUDOS REVISADOS.



2.6.1.1 Relevo/declividade

Áreas íngremes representam um desafio para a trafegabilidade de viaturas. Inclinações que excedem o limite máximo de rampa de uma viatura levam inevitavelmente à incapacidade de transposição do terreno ou à instabilidade que, em casos mais severos, pode ocasionar acidentes. Diante disso, o principal aspecto do relevo que se procura analisar é a declividade, que possui grande impacto na trafegabilidade (HUA *et al.*, 2024).

A camada de informação do relevo foi relatada na quase totalidade dos estudos revisados, com utilização de diferentes insumos para a aquisição dos dados de elevação. A qualidade desses dados, com destaque para a resolução espacial,

deve ser levada em consideração, em especial ao se analisar a trafegabilidade de VTNT, que normalmente são menores em dimensões do que viaturas tripuladas. Espera-se que quanto menor o seu tamanho, maiores serão as chances de não se conseguir transpor obstáculos formados pelo relevo, como pedras e fossos, a menos que se trate de um veículo com preparação específica em seu projeto construtivo (como os *rovers* planetários).

Destacam-se, quanto à camada de informação do relevo, os trabalhos que utilizaram insumos de alta qualidade, como no uso de bancos de dados de topografia na escala de 1:25.000 (DMU25) (HOFMANN *et al.*, 2014) combinado com o Modelo Digital de Elevação (MDE) DMR5 de 1 m de resolução espacial, ambos da República Tcheca, e MDE de 2 m de resolução espacial da Suécia (WICANDER, 2018); Banco de Dados Digitais de Elevação do Terreno (DTED) da Polônia, com insumos de resolução espacial de 1 m e erro altimétrico menor ou igual a 0,1 m, obtidos por tecnologia de Varredura a Laser Aerotransportado (*Airborne Laser Scanner – ALS*) (POKONIECZNY; BORKOWSKA, 2019); MDE local da República Tcheca (DMR4), com resolução espacial de 5 m (POKONIECZNY; RYBANSKY, 2018; RYBANSKY *et al.*, 2015); MDE de 5ª geração (DEM5) da República Tcheca e Modelo Digital de Superfície (MDS) de 1ª geração (DSM 1G), com 1 m de resolução espacial, obtidos por tecnologia ALS (RADA; RYBANSKY; DOHNAL, 2020; RADA; RYBANSKY; DOHNAL, 2021); e MDE local Buckeye, com resolução espacial de 1 m, obtidos junto ao Fundo Comum de Mapeamento (*Common Map Background – CMB*) do Centro Geoespacial do Exército dos Estados Unidos (REHRER; GRIFFIN; RENNER, 2022).

Outros autores obtiveram essa camada com uso de bases cartográficas na escala de 1:10.000 (TORREALBA, 2015); em banco de dados de elevação produzidos a partir de uma rede de grade regular de 50x50 m e técnicas fotogramétricas, com precisão vertical de 2,5 m (GUMOS, 2005); dos Dados Digitais de Elevação do Terreno Nível 2 (DTED2) do Marrocos, de 30 m de resolução espacial (GRANDJEAN; ANGELLIAUME, 2009); de banco de dados topográfico finlandês, com escala de 1:5.000 a 1:10.000, e dados topográficos com resolução espacial de 25 m e precisão vertical de 1,76 m (SUVINEN, 2006); de Mapa Vetorial nível 2 (*VMAP level 2*) em escala 1:50.000 (POKONIECZNY, 2022; POKONIECZNY; DAWID, 2023; POKONIECZNY; MOSCICKA, 2018); de dados de declividade preparados pelo Departamento de Engenharia e Levantamento da Universidade de Chulalongkorn, da Tailândia, na escala de 1:50.000 (PIMPA, 2012); por meio da extração de curvas de

nível de cartas topográficas (OLIVEIRA, 2006); e da Nuvem de Dados Geoespaciais (*Geospatial Data Clouds*) da China (HUA *et al.*, 2023; HUA *et al.*, 2024).

Observou-se a utilização de MDEs de caráter global em 17 dos 45 estudos revisados (QUADRO 2.3). Normalmente, os MDEs de caráter global são utilizados em áreas que não dispõem de MDEs locais de melhor qualidade. Ainda que não indicado o uso desses insumos, devido principalmente à baixa resolução espacial, que pode esconder obstáculos intransponíveis para as viaturas, esses insumos globais podem se constituir na única fonte de dados sobre o relevo na área de interesse, o que justifica o seu uso em aproximadamente 40% dos estudos revisados.

QUADRO 2.3 – UTILIZAÇÃO DE MDE DE CARÁTER GLOBAL.

Autor(es)	MDE utilizado
Grogan (2009); Hubacek <i>et al.</i> (2016); Kalugamuwa, Dinusha e Sandamali (2020); Pokonieczny (2017); Pokonieczny (2018a); Pokonieczny (2018b); Pokonieczny (2018c); Pokonieczny, Dawid e Borkowska (2021); Pundir e Garg (2020b); e Pundir e Garg (2021)	Missão Topográfica por Radar Embarcado (<i>Shuttle Radar Topographic Mission – SRTM</i>) com 30 m de resolução espacial.
Höfig e Araujo-Junior (2015); e Sadiya, James e Oladiti (2017)	SRTM com 90 m de resolução espacial.
Khan, Kashif e Shah (2021); e Veloza (2020)	ALOS PALSAR, com resolução espacial de 12,5 m, administrado pela Instalação de Satélite do Alasca (<i>Alaska Satellite Facility – ASF</i>).
Partida (2017); e Pundir e Garg (2020a)	Radiômetro Avançado de Reflexão e Emissão Térmica Espacial (<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer – ASTER</i>), com resolução espacial de 30 m, obtidas junto ao Serviço Geológico dos Estados Unidos (<i>United States Geological Survey – USGS</i>).
Potic <i>et al.</i> (2024)	Modelo Digital de Elevação Europeu (<i>European Digital Elevation Model – EU-DEM</i>), com 30 m de resolução espacial.

Como exemplo de aplicação dessa camada, pode-se classificar a declividade do terreno tomando-se como referência os valores padronizados em manuais – normalmente de cunho militar –, testes empíricos de campo ou uso de valores informados pelos fabricantes de viaturas. Assim, no Brasil, autores como Oliveira (2006), Partida (2017) e Veloza (2020) classificaram o relevo em plano (0° a 6°, adequado à trafegabilidade), ondulado (6° a 17°, restritivo à trafegabilidade), movimentado (17° a 26°, muito restritivo à trafegabilidade) e montanhoso (>26°,

impeditivo à trafegabilidade). Por sua vez, Khan, Kashif e Shah (2021) consideram e aconselham que inclinações superiores a 30° devam ser completamente evitadas.

2.6.1.1.1 Índice Topográfico de Umidade (TWI)

Beven e Kirkby (1979) estabeleceram pela primeira vez o Índice Topográfico de Umidade (*Topographic Wetness Index* – TWI), considerado um dos índices derivados do relevo mais úteis em áreas como hidrologia. Com base em uma região de drenagem ascendente e declividade superficial, esse índice reflete o grau de umidade do solo e é usado para quantificar as condições hidrológicas no terreno. O cálculo do TWI pode ser definido conforme Eq. (8) (QUINN *et al.*, 1991).

$$TWI = \ln \left(\frac{SCA}{\tan \beta} \right), \quad (8)$$

em que SCA é a Área de Captação Específica (*Specific Catchment Area*) e β o ângulo de declividade da superfície local. O índice é dimensionado pelo logaritmo natural. De acordo com essa formulação, a umidade do solo aumenta com o aumento do acúmulo de fluxo de água e diminuição da declividade local. Para o cálculo da SCA, utiliza-se a Eq. (9) (QUINN *et al.*, 1991).

$$SCA = \frac{Acumulação_{fluxo}}{w}, \quad (9)$$

em que a acumulação de fluxo representa a quantidade de água que converge para uma determinada célula a partir das células adjacentes, sendo a área total que contribui para o escoamento em um ponto específico do terreno. Por isso, também é conhecida como Área de Captação Total (*Total Catchment Area* – TCA). Por seu turno, w é a largura do fluxo de água ao longo de uma curva de nível (linha de igual elevação), sendo a medida transversal do caminho da água, perpendicular à direção do fluxo. Assim, é a largura sobre a qual a água se dispersa enquanto escoar pelo declive. Ela influencia a quantidade de água que pode se acumular em uma SCA e é importante porque a normaliza, permitindo uma comparação mais precisa da distribuição espacial da umidade do solo. Uma largura de fluxo maior indica que a água está dispersa por uma área mais ampla, enquanto uma largura menor significa que a água está concentrada em um caminho mais estreito (HE *et al.*, 2023).

O conceito básico do TWI está ligado ao balanço de massa: a SCA é um parâmetro da tendência a receber água, enquanto a declividade local β e a largura do fluxo w descrevem a tendência à evacuação de água. A SCA determina a área à montante (obtida pelo número de células) que drena água para uma célula específica. Um algoritmo de roteamento de fluxo pode ser usado para verificar como a água flui na superfície e estabelecer a direção do fluxo para cada célula (MATTIVI *et al.*, 2019).

Em encostas íngremes, o escoamento tende a ser maior, o que limita a capacidade de armazenamento e gera áreas secas bem drenadas, associadas a baixos valores de TWI. Em contraste, as áreas mais baixas tendem a possuir maiores valores de TWI, uma vez que apresentam maior potencial de armazenamento de água no solo (áreas de drenagem) (GAMBO *et al.*, 2024).

A umidade modelada por meio desse índice exerce forte influência na trafegabilidade, uma vez que o solo seco tende a ser mais compacto e estável, permitindo uma travessia mais fácil, enquanto o solo úmido se torna escorregadio e menos estável (POTIC *et al.*, 2024).

2.6.1.1.2 Índice Topográfico de Rugosidade (TRI)

O Índice Topográfico de Rugosidade (*Topographic Ruggedness Index* – TRI) foi criado por Riley, Degloria e Elliot (1999) para expressar a diferença de elevação entre células adjacentes de um modelo de elevação, ou seja, visa quantificar a heterogeneidade topográfica local. Para tanto, calcula a diferença nos valores de elevação de uma célula central e das suas células vizinhas (vizinhança 8) (FIGURA 2.7) com emprego da Eq. (10).

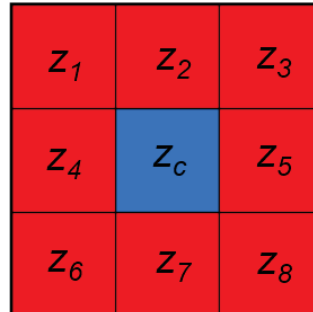
$$TRI = \sqrt{\sum_{i=1}^8 (z_c - z_i)^2} , \quad (10)$$

em que z_c é a elevação na célula central e z_i é a elevação nas células vizinhas, com i variando de 1, 2, ..., a 8.

O TRI fornece uma representação numérica da rugosidade do terreno, que pode afetar significativamente a trafegabilidade. Por exemplo, áreas com altos valores de TRI indicam terrenos muito ondulados, que podem ser difíceis para a

trafegabilidade. Em contraste, baixos valores de TRI sugerem terrenos mais suaves, que podem ser mais facilmente trafegáveis (POTIC *et al.*, 2024).

FIGURA 2.7 – VIZINHANÇA 8 UTILIZADA NO CÁLCULO DO TRI.



2.6.1.2 Vegetação

A vegetação exerce forte influência sobre a trafegabilidade, uma vez que quanto maior a densidade vegetal, mais restritiva será à trafegabilidade. Uma mata fechada, por exemplo, será impeditiva, enquanto vegetações rasteiras, de poucos centímetros de altura em relação ao solo, oferecem pouca ou nenhuma restrição.

A obtenção de dados sobre a vegetação pode ser realizada por meio de bases vetoriais, com uso de mapas topográficos na escala de 1:50.000 (GUMOS, 2005); banco de dados espaciais equivalente a um mapa topográfico na escala 1:25.000 (POKONIECZNY; RYBANSKY, 2018) e na escala 1:50.000 (POKONIECZNY, 2018b; POKONIECZNY, 2018c; POKONIECZNY, 2022; POKONIECZNY; DAWID, 2023; POKONIECZNY; MOSCICKA, 2018); banco de dados de Uso e Cobertura da Terra Corine (*Corine Land Cover* – CLC) da Agência Europeia de Meio Ambiente (*European Environment Agency* – EEA) em escala 1:100.000 (POKONIECZNY, 2020; POKONIECZNY; DAWID; BORKOWSKA, 2021; POTIC *et al.*, 2024); Banco de Dados de Objetos Topográficos na escala 1:10.000 (BDOT10k) do Centro de Geodésia e Cartografia da Polônia (POKONIECZNY, 2018a); e Banco de Dados Geográficos do Exército Brasileiro (BDGEx) combinado com dados abertos (VELOZA, 2020).

Outros autores empregaram mapas cadastrais e topográficos nas escalas de 1:50.000, 1:100.000 e 1:250.000 (POKONIECZNY, 2017); ortofotocartas em escala 1:10.000 (TORREALBA, 2015); mapas de uso e cobertura da terra obtidos do Centro Geoespacial do Exército Americano (REHRER; GRIFFIN; RENNER, 2022); dados LANDFIRE, disponibilizados pelo Servidor Nacional de Mapas dos Estados Unidos,

com resolução espacial de 30 m (GROGAN, 2009); mapas topográficos do Exército Tcheco (RYBANSKY *et al.*, 2015); e mapa de uso e cobertura da terra na escala 1:50.000 (KALUGAMUWA; DINUSHA; SANDAMALI, 2020). Por outro lado, alguns estudos revisados utilizaram métodos de classificação de imagens, índices espectrais e vetorização manual, conforme sintetizado no QUADRO 2.4.

QUADRO 2.4 – OBTENÇÃO DE DADOS SOBRE A VEGETAÇÃO POR MEIO DE TÉCNICAS DE CLASSIFICAÇÃO, ÍNDICES ESPECTRAIS E VETORIZAÇÃO MANUAL.

Autor(es)	Técnica	Insumos
Khan, Kashif e Shah (2021); e He <i>et al.</i> (2023)	Classificação supervisionada	Imagens Sentinel-2.
Sadiya, James e Oladiti (2017)		Imagens NigeriaSat-2 e NigeriaSat-X.
Oliveira (2006)		Imagens Landsat 7, sensor ETM.
Pundir e Garg (2020b); e Pundir e Garg (2021)		Imagens Landsat 8, sensor OLI.
Pimpa (2012)		Dados obtidos do Departamento de Levantamento Real Tailandês (<i>Royal Thai Survey Department – RTSD</i>), em escala 1:50.000.
Pimpa, Sarapirome e Dasananda (2014)		Imagens orbitais.
Pundir e Garg (2020a)	Classificação não supervisionada	
Pundir e Garg (2022)	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (<i>Normalized Difference Vegetation Index – NDVI</i>) e Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (<i>Soil-Adjusted Vegetation Index – SAVI</i>)	
Partida (2017)		Imagens MODIS da Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (<i>National Aeronautics and Space Administration – NASA</i>).
Hubacek <i>et al.</i> (2016)	Vetorização manual	Imagem orbital multiespectral.
Wicander (2018)		Ortofotos de altíssima resolução espacial (0,25 m e 0,5 m).

Destacam-se os autores que utilizaram fontes de dados de alta resolução espacial para a verificação da vegetação em suas respectivas áreas de estudo, o que pressupõe uma maior assertividade na determinação de vegetações que possam influenciar a trafegabilidade de viaturas:

a) Rada, Rybansky e Dohnal (2020), que utilizaram dados de alta qualidade do Plano Econômico Florestal (*Forestry Economic Plan – FEP*) geridos pelo Instituto de Gestão Florestal da República Tcheca, em conjunto com imagens de drone;

b) Rada, Rybansky e Dohnal (2021), que usaram informações coletadas por meio de levantamento de campo, em conjunto com dados do DSM 1G;

c) Suvinen (2006), que fez uso de diferentes fontes de dados, visando a um mapeamento mais preciso, com combinação de um mapa topográfico, imagens de satélite e dados adicionais do Instituto Finlandês de Pesquisa Florestal; e

d) Pokonieczny e Borkowska (2019), que se basearam em um mapa em escala cadastral de 1:500 do Instituto Nacional de Geodésia e Cartografia da Polônia.

Como exemplo de aplicação da camada de informação de vegetação, pode-se, conforme classificação realizada por Oliveira (2006), utilizar-se de três classes de restrições à trafegabilidade: impeditivo (conglomerado de árvores que impeçam a trafegabilidade, a exemplo do que ocorre em florestas), restritivo (árvores espaçadas) e adequado (pastagens e vegetação rasteira).

2.6.1.3 Cursos e corpos d'água

Abrange os elementos que compõem a hidrografia, quase todos com alta restrição à trafegabilidade de viaturas não anfíbias. Verificou-se, nos estudos revisados, que todos os autores analisaram viaturas não anfíbias, mesmo nos trabalhos que tiveram como foco a área militar. Normalmente, viaturas anfíbias são encontradas nas Forças Armadas para serem utilizadas em operações especiais de combate, possuindo um alto custo de produção e manutenção.

Para a obtenção de informações sobre os cursos e corpos d'água, os autores Pundir e Garg (2022) realizaram o cálculo do Índice de Água por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Water Index* – NDWI); Pimpa, Sarapirome e Dasananda (2014) empregaram técnicas de classificação de imagens; e Suvinen (2006) fez uso de fotografias aéreas na escala 1:16.000, mapa base de hidrografia (1:10.000) e dados coletados em levantamentos de campo. Os demais estudos revisados utilizaram-se dos insumos especificados no QUADRO 2.5.

Como exemplo de aplicação da camada de curso e corpos d'água, no estudo de Oliveira (2006), verificaram-se as classes de restrição à trafegabilidade: impeditiva (profundidade maior ou igual a 1,5 m), restritiva (profundidade maior ou igual a 0,6 m e menor que 1,5 m) e adequada (profundidade menor que 0,6 m).

QUADRO 2.5 – INSUMOS PARA A OBTENÇÃO DA CAMADA DE CURSOS E CORPOS D'ÁGUA.

Autor(es)	Escala/ Resolução espacial	Tipo	Especificação
He <i>et al.</i> (2023); e Khan, Kashif e Shah (2021)	10 m	Dados matriciais	Sentinel-2, obtidas via Copernicus, da Agência Espacial Europeia (<i>European Space Agency</i> – ESA), submetidas a processo de classificação.
Oliveira (2006)			SPOT 5, sensor Alta Resolução Visível (<i>High Visible Resolution</i> – HVR).
Partida (2017); Pundir e Garg (2020b); e Pundir e Garg (2021)	30 m		Landsat 8, sensor Imageador Terrestre Operacional (<i>Operational Land Imager</i> – OLI).
Pimpa (2012)	1:50.000		RTSD da Tailândia.
Sadiya, James e Oladiti (2017)	22 m e 2,5 m		NigeriaSat-X e NigeriaSat-2.
Wicander (2018)	0,25 m e 0,5 m		Ortofotos com aplicação de técnicas de classificação de imagens.
Kalugamuwa, Dinusha e Sandamali (2020)	1:50.000		Cartas e mapas
Pokonieczny (2017)	1:50.000, 1:100.000 e 1:250.000	Mapas topográficos.	
Pokonieczny e Borkowska (2019)	1:500	Mapas do Instituto Nacional de Geodésia e Cartografia da Polônia.	
Pundir e Garg (2020a); e Pundir e Garg (2022)	Não especificado	Não especificado.	
Rada, Rybansky e Dohnal (2021)		Mapas produzidos na década de 1950, disponibilizados com uso de Serviço de Mapa na Rede (<i>Web Map Service</i> – WMS).	
Rybansky <i>et al.</i> (2015)		Mapas topográficos militares confeccionados pelo Exército Tcheco.	
Grogan (2009)	1:12.000	Dados vetoriais	Dados da Biblioteca de Dados Geográficos do Condado de Pima, Arizona, Estados Unidos.
Gumos (2005)	Não especificado		Banco de dados de bacias hidrográficas da Suécia.
Hubacek <i>et al.</i> (2016)			Banco de dados geográficos local.
Pokonieczny (2018a); Pokonieczny (2018b); Pokonieczny (2018c); Pokonieczny (2020); Pokonieczny (2022); Pokonieczny e Dawid (2023); Pokonieczny, Dawid e Borkowska (2021); e Pokonieczny e Moscicka (2018)	1:50.000		
Pokonieczny e Rybansky (2018)	1:25.000		
Potic <i>et al.</i> 2024	1:10.000		Mapa Viário Aberto (<i>OpenStreetMap</i> – OSM).
Torrealba (2015)			Projeto SIG de Recursos Hídricos do Alto Iguaçu, Paraná.

2.6.1.4 Solo

Conforme YIN *et al.* (2024), a trafegabilidade fora de estrada é altamente incerta devido à indeterminação das condições do solo no momento do deslocamento. Essa indeterminação é ocasionada pelas propriedades do solo e sua interação com outras variáveis locais, como as condições meteorológicas. Por exemplo, a argila proporciona uma superfície dura com excelente trafegabilidade quando seca, mas torna-se escorregadia e pegajosa quando molhada (POTIC *et al.*, 2024). Isso se deve ao seu comportamento particular na presença de água: seus grãos encolhem em condições secas e incham com a umidade (DUCASSE *et al.*, 2024).

O solo é um fator crucial na modelagem da trafegabilidade, na medida em que está relacionado diretamente à permeabilidade de água, tendo efeitos sobre a umidade da superfície e, conseqüentemente, sobre o suporte à trafegabilidade. O tamanho, a forma e o arranjo dos grãos e dos poros têm um impacto significativo na vazão e infiltração da água. A textura do solo influencia diretamente a porosidade e a permeabilidade, com solos de grãos finos exibindo menores taxas de infiltração do que solos de grãos mais grossos (GAMBO *et al.*, 2024).

O impacto da umidade na capacidade de suporte do solo é mais forte em solos coesos de textura fina, com baixa capacidade de drenagem (como solos argilosos) e mais fraco em solos arenosos de textura grossa, bem drenados. Por outro lado, solos arenosos podem apresentar desafios para a tração adequada (os populares bancos de areia ou "areíões"). Solos com areia ou cascalho permitem maior infiltração de água no subsolo (SALMIVAARA *et al.*, 2020). Solos menos porosos, compostos por argila, podem impedir a infiltração e favorecer o acúmulo de água, transformando-os em uma superfície lamacenta ou barrenta (TWAHA *et al.*, 2024).

Detalhes sobre os tipos de solos de uma região podem ser obtidos a partir de mapas topográficos, de solos (pedológicos) ou geológicos, fotos aéreas e, mais precisamente, por meio de levantamentos de campo. Como exemplos de formas de obtenção da camada de informação de solo, Oliveira (2006) fez uso de levantamentos de campo e de mapas pedológicos e geomorfológicos; Veloza (2020) aplicou técnicas de classificação supervisionada em imagens de alta resolução espacial; Rybansky *et al.* (2015) empregaram banco de dados de solo, fotogrametria digital e ALS; e Sadiya, James e Oladiti (2017) utilizaram dados de material de superfície do Ministério da Agricultura da Nigéria e imagens MODIS. Não obstante, o mais comum e recorrente

na literatura especializada é a utilização de mapas pedológicos e dados vetoriais, conforme pode ser observado no QUADRO 2.6.

QUADRO 2.6 – INSUMOS PARA FORMAÇÃO DA CAMADA DE INFORMAÇÃO DE SOLO.

Autor(es)	Escala/ Resolução espacial	Tipo	Especificação
Gumos (2005)	1:50.000	Mapa pedológico	Mapa de depósitos quaternários.
Hua <i>et al.</i> (2023); e Hua <i>et al.</i> (2024)	Não especificado		Sistema de Informações de Solo da China (SISChina).
Khan, Kashif e Shah (2021)	1:200.000		Produzido pelo Centro Europeu de Dados de Solos (<i>European Soil Data Centre – ESDAC</i>) da Comissão Europeia.
Pokonieczny (2017); Pokonieczny (2018a); e Pokonieczny (2022)			Mapas táticos da Diretoria de Geografia Militar da Polônia.
Potic <i>et al.</i> (2024)	Não especificado		Em combinação com documentos locais sobre as características do solo da Sérvia.
Rada, Rybansky e Dohnal (2021)	1:50.000 e 1:200.000		Gerenciados pelo Serviço Geológico Tcheco; mapas desatualizados, com dados captados há mais de 60 anos.
Rehrer, Griffin e Renner (2022)	30 m		Obtidos no portal CMB, do Centro Geoespacial do Exército Americano.
Grogan (2009)	1:24.000	Conjunto de dados vetoriais	Dados Geográficos do Condado de Pima, Arizona, Estados Unidos.
Kalugamuwa, Dinusha e Sandamali (2020)	Não especificado		Obtidos do Departamento de Agricultura e do Centro de Gerenciamento de Desastres, ambos do Sri Lanka.
Partida (2017)	1:250.000		Cartografia topográfica da Diretoria de Geografia e Cartografia da Força Armada Nacional Venezuelana.
Pimpa (2012)	1:50.000		Obtidos do RTSD.
Pokonieczny e Borkowska (2019)	Não especificado		BDOT10k, de altíssima resolução espacial.
Suvinen (2006)	1:20.000		Não especificado.

A umidade do solo pode ser medida por levantamentos de campo ou por meio de SR. Os levantamentos de campo requerem muitas horas de trabalho e uso de equipamentos relativamente caros, não sendo eficientes para medições contínuas em grandes áreas. Os métodos baseados em SR fornecem uma maneira econômica de estimar continuamente a umidade do solo a partir de ondas do espectro visível, infravermelho e micro-ondas, tendo como desvantagem a menor assertividade dos dados coletados.

Para a obtenção da umidade do solo com uso de SR, pode-se calcular, por exemplo, o Índice de Umidade do Solo (*Soil Moisture Index* – SMI) com as bandas espectrais do Infravermelho de Ondas Curtas (*Short-Wave Infrared* – SWIR) e do Infravermelho Próximo (*Near Infrared* – NIR). O valor obtido é um indicador do teor de umidade presente na camada superior do solo, sendo capaz de fornecer dados representativos sobre o potencial do solo em suportar a trafegabilidade de viaturas. Uma outra possibilidade é o emprego do TWI, com uso de um Modelo Digital do Terreno (MDT) (HE *et al.*, 2023).

Verificou-se, ainda, nos estudos revisados, a obtenção de dados de umidade do solo com o emprego do sistema de Umidade de Solo Ativo e Passivo (*Soil Moisture Active Passive* – SMAP) da NASA e da plataforma indiana Bhuvan do Centro de Arquivo de Dados de Satélites Meteorológicos e Oceanográficos (*Meteorological and Oceanographic Satellite Data Archival Centre* – MOSDAC), com resolução espacial de 1 km (PUNDIR; GARG, 2020a).

De certa forma, quando da análise da umidade do solo, alguns autores parecem optar pela adoção de modelos simplificados, com uso de três classes categóricas: seco (*dry*), úmido (*moist* ou *humid*) e saturado (*wet* ou *saturated*) (GUMOS, 2005; HE *et al.*, 2023; HOFMANN *et al.*, 2014; HUBACEK *et al.*, 2014; HUBACEK *et al.*, 2016; KALUGAMUWA; DINUSHA; SANDAMALI, 2020; KHAN; KASHIF; SHAH, 2021; PUNDIR; GARG, 2020b; REHRER; GRIFFIN; RENNER, 2022; TORREALBA, 2015; WICANDER, 2018).

Outros autores optaram pela verificação do tipo e umidade do solo com a inclusão de levantamentos de campo – com coleta de amostras e inspeção em laboratório ou realização de medições penetrométricas. Há uma ligeira preferência na aplicação deste último, uma vez que a medição do Índice de Cone, por equipamento penetrômetro de cone, pode indicar diretamente a resposta do solo à trafegabilidade. Diante disso, levantamentos de campo foram realizados para a coleta de amostras e de informações sobre a textura e umidade do solo (HUBACEK *et al.*, 2014; HUBACEK *et al.*, 2016; PUNDIR; GARG, 2020b; PUNDIR; GARG, 2021; PUNDIR; GARG, 2022); e um penetrômetro de cone, modelo E-960, foi usado para obtenção de dados de solos locais, com posterior combinação com um banco de dados de solos tcheco (escala 1:50.000) e sueco (escalas 1:25.000 e 1:100.000) (WICANDER, 2018).

2.6.1.5 Feições antrópicas

As feições antrópicas compreendem as construções civis, como pontes, túneis e vias, que podem influenciar positivamente a trafegabilidade. Caso haja esses tipos de feição em uma determinada área, normalmente será preferível utilizá-las como meio de deslocamento, por questões de segurança da viatura, do motorista e equipe. Cita-se ainda a economia de combustível se comparado ao gasto geralmente superior no deslocamento fora de estrada, pelo maior torque e potência do motor da viatura necessários para transpor obstáculos do terreno natural.

Para obtenção dessa camada de informação, foram utilizadas técnicas de classificação de imagens (PIMPA; SARAPIROME; DASANANDA, 2014); imagens Landsat 8 (HE *et al.*, 2023); cartas topográficas com informação sobre áreas de habitação e infraestrutura e serviço de mapas Bhuvan, da Índia (PUNDIR; GARG, 2020a; PUNDIR; GARG, 2020b); mapas topográficos em escalas 1:50.000, 1:100.000 e 1:250.000 (POKONIECZNY, 2017) e escalas 1:25.000 e 1:100.000 (HUBACEK *et al.*, 2016); dados do Projeto de Levantamento da Índia (PUNDIR; GARG, 2021) e do Exército Tcheco (RYBANSKY *et al.*, 2015); ortofoto e mapa do norte da Suécia (WICANDER, 2018); e cartas topográficas para extração das vias de transporte – rodovias, trilhas e arruamentos (OLIVEIRA, 2006).

Dados vetoriais também foram empregados por alguns autores, com utilização de banco de dados de estradas da Finlândia, com precisão planimétrica de 1 a 3 m (SUVINEN, 2006); dados coletados no BDGEx e em bancos de dados abertos (VELOZA, 2020); malha viária do Departamento de Levantamentos do Sri Lanka (KALUGAMUWA; DINUSHA; SANDAMALI, 2020); dados obtidos do Departamento de Estradas de Rodagem (*Department of Highways* – DOH) da Tailândia, em escala 1:50.000 (PIMPA, 2012); dados do OSM² (POKONIECZNY, 2018a; POKONIECZNY; DAWID; BORKOWSKA, 2021; POTIC *et al.*, 2024); VMAP nível 2 em escala 1:50.000 (POKONIECZNY, 2018b; POKONIECZNY, 2018c; POKONIECZNY, 2020; POKONIECZNY, 2022; POKONIECZNY; DAWID, 2023; POKONIECZNY;

² O OSM é um projeto de Informações Geográficas Voluntárias (*Volunteered Geographic Information* – VGI) estruturado na contribuição de voluntários, sob licença de conteúdo aberto e com foco na vetorização de infraestruturas de transporte. Não obstante, é possível a coleta, por meio dos dados vetorizados na plataforma OSM, de outras feições de interesse para a trafegabilidade, como edificações e classes de uso e cobertura da terra. O nível de detalhe dos vetores varia entre as escalas 1:10.000 e 1:25.000 (POKONIECZNY; DAWID; BORKOWSKA, 2021).

MOSCICKA, 2018) e na escala 1:25.000 (POKONIECZNY; RYBANSKY, 2018); além de malhas viárias e zonas edificadas obtidas da Agência Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Espacial (*National Space Research and Development Agency – NASRDA*) da Nigéria (SADIYA; JAMES; OLADITI, 2017).

2.6.1.6 Condições meteorológicas

A trafegabilidade de viaturas é influenciada não só pelo tipo de solo, mas também pela quantidade de água que esse solo contém. Quanto mais água houver, menos resistente tende a ser o solo, fazendo com que as viaturas afundem, criando uma camada adicional de resistência que pode dificultar ou até mesmo impedir completamente a trafegabilidade, o que se conhece popularmente como “atolar”. Outro problema é a diminuição da aderência que a água cria entre o solo e a viatura, o que também poderá restringir ou dificultar a trafegabilidade, pelo deslizamento entre as superfícies, o que se conhece como “patinar”.

Como uma das fontes primárias de água na camada superior do solo é a precipitação, faz-se necessário coletar informações sobre as condições meteorológicas em um período imediatamente anterior ao deslocamento ou, pelo menos, realizar uma previsão para dada época do ano. Também, a temperatura, a umidade relativa do ar e a velocidade média do vento são importantes para a análise da umidade do solo, uma vez que podem ajudar a diminuí-la por meio da evaporação.

Visando ao desenvolvimento de mapas de trafegabilidade de viaturas, pode-se operacionalizar a camada de informação de condições meteorológicas com a utilização de séries históricas. Nesse caso, o produto cartográfico gerado será um mapa de “previsão” da trafegabilidade, o que possui como vantagem a simplificação pelo uso de estatísticas de anos anteriores. Contudo, terá como desvantagem uma maior incerteza quanto à possibilidade de deslocamento no terreno, uma vez que as condições meteorológicas previstas, baseadas em parâmetros estatísticos de períodos anteriores, podem não se repetir em períodos subsequentes.

Informações meteorológicas geralmente estão disponíveis a partir de previsões e registros meteorológicos, boletins climáticos ou entrevistas com moradores locais. Os principais efeitos ocasionados pelas condições meteorológicas incidem sobre o solo, uma vez que a umidade interfere diretamente em sua capacidade de carga, resistência ao rolamento e tração no contato com os diferentes

tipos de rodados. Efeitos secundários operam na hidrografia, já que pode haver um aumento do nível d'água em curso/corpos d'água, com subseqüentes inundações de regiões adjacentes.

Devido à maior complexidade em lidar com as condições meteorológicas, diferentes abordagens para o problema foram adotadas nos estudos revisados, as quais citam-se: elaboração de mapa de precipitação para os meses de janeiro/fevereiro/março (maior ocorrência de chuvas rigorosas e constantes) e outro para os meses de julho/agosto/setembro (poucas chuvas, com menor restrição à trafegabilidade) (OLIVEIRA, 2006); divisão de áreas em secas, úmidas e saturadas, com base nos parâmetros meteorológicos observados (KHAN; KASHIF; SHAH, 2021); utilização de dados do Gabinete Geográfico e Hidrometeorológico Militar Tcheco (HUBACEK *et al.*, 2016); dados pluviométricos e de temperatura em formato *raster*, com 1 km de resolução espacial, fornecidos pela Universidade da Califórnia, por meio do sistema de interpolação de superfícies climáticas terrestres globais (*WorldClim*), de uma série temporal de 1970 a 2000 (PARTIDA, 2017); dados do Ministério do Meio Ambiente e Energia da Suécia (WICANDER, 2018); e dados do serviço de meteorologia *OpenWeatherMap*, que fornece dados históricos, atuais e previsões, com resolução espacial de 10 km (POKONIECZNY, 2022).

Uma importante observação para essa camada foi realizada por Hestera e Pahernik (2018), que aconselham utilizar previsões apenas para o curto prazo, até 72 horas de antecedência do deslocamento, na medida em que a assertividade das previsões diminui em períodos mais longos. Entretanto, cabe ressaltar que nem sempre essa melhor prática indicada por esses autores será possível, em especial quando houver a necessidade de elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas para utilização futura em médio ou longo prazo. Nesse caso, a melhor abordagem poderá ser a de prever as condições meteorológicas de acordo com as estações ou meses do ano. Não obstante, haverá, nesse caso, uma menor assertividade, dada a volatilidade das condições meteorológicas para diferentes anos e épocas.

2.6.2 Escala de trabalho

De acordo com os objetivos a serem atingidos e qualidade dos insumos utilizados, podem ser elaborados mapas de trafegabilidade de viaturas em diferentes escalas. Normalmente, produtos cartográficos utilizados por autoridades civis ou

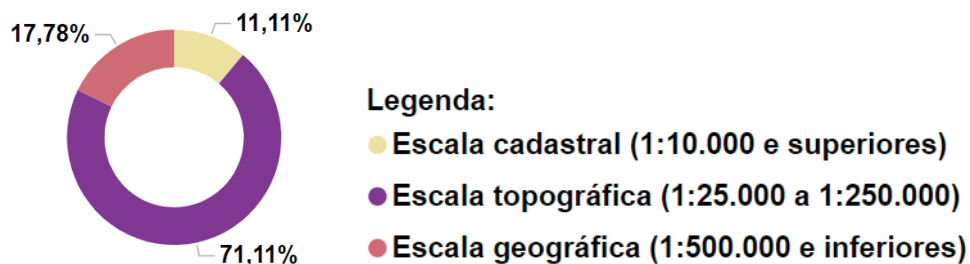
militares buscam representar grandes áreas, com alta generalização cartográfica, a fim de possibilitar o planejamento em nível estratégico. Quando o objetivo é auxiliar o próprio motorista da viatura, visando atender ao nível operacional, normalmente utilizam-se escalas grandes, que permitam a observação de detalhes do terreno. As escalas de trabalho dos estudos revisados para a elaboração de seus mapas de trafegabilidade de viaturas foram as especificadas no QUADRO 2.7.

QUADRO 2.7 – ESCALAS DE TRABALHO DOS ESTUDO REVISADOS.

Autor(es)	Escala
Pokonieczny e Borkowska (2019); Pokonieczny e Rybansky (2018); Rada, Rybansky e Dohnal (2020); Rada, Rybansky e Dohnal (2021); e Suvinen (2006)	Cadastrais não especificadas
Rybansky <i>et al.</i> (2014); Rybansky <i>et al.</i> (2015); Torrealba (2015); e Veloza (2020)	1:25.000
Oliveira (2006)	1:150.000
Partida (2017); Pokonieczny (2018a); e Pokonieczny e Moscicka (2018)	1:250.000
Flores, Entekhabi e Bras (2014); Grandjean e Angelliaume (2009); Grogan (2009); Gumos (2005); Höfig e Araujo-Junior (2015); Hofmann <i>et al.</i> (2014); Hubacek <i>et al.</i> (2014); Hubacek <i>et al.</i> (2016); Khan, Kashif e Shah (2021); Pokonieczny (2017); Pokonieczny (2018b); Pokonieczny (2018c); Pokonieczny (2020); Pokonieczny (2022); Pokonieczny e Dawid (2023); Pundir e Garg (2020b); Pundir e Garg (2021); Pundir e Garg (2022); Rehner, Griffin e Renner (2022); e Wicander (2018)	Topográficas não especificadas
He <i>et al.</i> (2023); Hua <i>et al.</i> (2023); Hua <i>et al.</i> (2024); Pimpa, Sarapirome e Dasananda (2014); Pokonieczny, Dawid e Borkowska (2021); e Pundir e Garg (2020a); Sadiya, James e Oladiti (2017)	Geográficas não especificadas

Como pode ser observado na FIGURA 2.8, o grupo de escala de preferência para a elaboração dos mapas de trafegabilidade de viaturas é o de escalas topográficas, que estiveram presentes em quase três quartos dos estudos revisados. As escalas grandes (escalas cadastrais) foram exploradas em apenas cinco dos 45 estudos revisados (abaixo de 12%), o que demonstra uma menor preocupação dos autores com a elaboração de trabalhos voltados para os usuários do nível operacional, como os motoristas e equipes. Outro fator que explica a menor disposição dos autores em utilizar esse tipo de escala está atrelado à carência de insumos de alta qualidade em determinadas áreas, como MDEs de alta resolução espacial. Além disso, o alto custo para obtê-los, quando disponíveis para aquisição, pode inviabilizar a produção de mapas em escalas grandes ao impactar o orçamento disponível.

FIGURA 2.8 – PERCENTUAL DAS ESCALAS DE TRABALHO DOS ESTUDOS REVISADOS.



Nessa análise (FIGURA 2.8), seriam mais de 88% (somados os mapas elaborados nas escalas topográficas e geográficas) relacionados com as escalas da Cartografia Sistemática Brasileira, inegavelmente, maior fonte de dados disponíveis aos usuários atualmente. No Brasil, esses dados são, em especial, derivados de trabalhos realizados pelos dois principais órgãos da Cartografia Nacional – a Diretoria de Serviço Geográfico (DSG) e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

2.6.3 Softwares e equipamentos

Os *softwares* e equipamentos utilizados em cada um dos estudos revisados foram dispostos no QUADRO 2.8. Percebe-se que o penetrômetro foi o equipamento mais usado (oito vezes), o que demonstra a preocupação de parte dos autores em verificar com maior assertividade as características do solo na trafegabilidade de viaturas. Quanto aos *softwares*, houve uma grande inclinação à utilização do ArcGIS, com emprego em aproximadamente metade dos estudos revisados.

Ressalta-se que o QGIS foi empregado em somente três estudos, não obstante seja capaz de realizar processamentos semelhantes ao ArcGIS, tendo amplo uso no Brasil, em especial em universidades públicas e em órgãos como o Exército Brasileiro. Observa-se que a falta de divulgação dos SIGs utilizados em 21 dos 45 estudos impediu a obtenção de informações conclusivas sobre as preferências dos autores revisados no emprego de diferentes SIGs.

QUADRO 2.8 – *SOFTWARES E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS ESTUDOS REVISADOS.*

Softwares	Equipamentos	Autor(es)
Não divulgado		Flores, Entekhabi e Bras (2014); Grandjean e Angelliaume (2009); Grogan (2009); Pokonieczny (2018a); Pokonieczny (2018c); Pokonieczny e Dawid (2023); Pokonieczny, Dawid e Borkowska (2021); Pokonieczny e Rybansky (2018); Potic <i>et al.</i> (2024); Pundir e Garg (2020a); Rada, Rybansky e Dohnal (2021); Rehrer, Griffin e Renner (2022); Rybansky (2007); e Rybansky <i>et al.</i> (2014)
ArcGIS desktop 9.0	GPS ¹	Gumos (2005)
Não divulgado	Penetrômetro	He <i>et al.</i> (2023); Hestera e Pahernik (2018); e Hubacek <i>et al.</i> (2016)
ArcGIS	Não divulgado	Höfig e Araujo-Junior (2015); Hofmann <i>et al.</i> (2014); Hua <i>et al.</i> (2023); Hua <i>et al.</i> (2024); Kalugamuwa, Dinusha e Sandamali (2020); Partida (2017); Pimpa, Sarapirome e Dasananda (2014); e Sadiya, James e Oladiti (2017)
	Penetrômetro	Hubacek <i>et al.</i> (2014); e Wicander (2018)
ArcMap 10.3 e ArcGIS	Não divulgado	Khan, Kashif e Shah (2021)
ArcGIS 9.1 e ENVI 4.2	GPS de mão Garmin	Oliveira (2006)
ArcGIS 9.3.1 e MapWinGIS	Não divulgado	Pimpa (2012)
ArcGIS, QGIS, PostgreSQL 9.5 e PostGIS 2.2		Pokonieczny (2017)
QGIS		Pokonieczny (2018b)
PostgreSQL e extensão PostGIS		Pokonieczny (2020); e Pokonieczny (2022)
ArcMap 10.5		Pokonieczny e Borkowska (2019)
Não divulgado	GNSS ²	Pokonieczny e Moscicka (2018)
ERDAS <i>IMAGINE</i> e ArcGIS	Não divulgado	Pundir e Garg (2020b)
	Penetrômetro e medidor de umidade digital	Pundir e Garg (2021)
ERDAS <i>IMAGINE</i> e SIG não especificado	Penetrômetro	Pundir e Garg (2022)
ArcGIS	Drone DJI Phantom 3	Rada, Rybansky e Dohnal (2020)
	Penetrômetro e GNSS	Rybansky <i>et al.</i> (2015)
	GPS	Suvinen (2006)
Global Mapper, ArcGIS e Shell Expert SINTA	Não divulgado	Torrealba (2015)
ArcGIS 10.6.1 e QGIS 3.4	Drone (VANT) e GNSS	Veloza (2020)

Nota¹: Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System* – GPS).

Nota²: Sistema Global de Navegação por Satélite (*Global Navigation Satellite System* – GNSS).

2.6.4 Levantamentos de campo

Foi observado que alguns autores revisados realizaram levantamentos de campo com finalidades diversas, dentre as quais citam-se: coleta de pontos de controle com receptor de navegação, por meio do método de posicionamento cinemático, para fins de orientação em deslocamento, localização e confirmação posicional de trilhas e estradas (GUMOS, 2005; OLIVEIRA, 2006; POKONIECZNY; MOSCICKA, 2018; RYBANSKY *et al.*, 2015; SUVINEN, 2006; VELOZA, 2020); validação dos resultados de modelo de trafegabilidade de viaturas (HOFMANN *et al.*, 2014); testes de usabilidade com os usuários previstos para o mapa elaborado (POKONIECZNY, 2018b); coleta de amostras (PUNDIR; GARG, 2020b); verificação do solo local (HE *et al.*, 2023; HESTERA; PAHERNIK, 2018; HUBACEK *et al.*, 2014; HUBACEK *et al.*, 2016; PUNDIR; GARG, 2021; PUNDIR; GARG, 2022; RYBANSKY *et al.*, 2015; WICANDER, 2018); e obtenção de imagens de drone (RADA; RYBANSKY; DOHNAL, 2020; VELOZA, 2020).

Também foram realizados levantamentos de campo para teste da trafegabilidade do blindado sobre lagartas BVP-2 e sobre rodas Pandur, caminhão militar Tatra-815, Landrower110 e viatura UAZ469, por meio de cálculos do impacto dos fatores geográficos na trafegabilidade (RYBANSKY *et al.*, 2014); do carro de combate T-72 (RYBANSKY *et al.*, 2015); de tratores agrícolas (SUVINEN, 2006); e de quatro diferentes tipos de viaturas militares – uma leve e outra blindada sobre rodas e duas sobre lagartas (HUBACEK *et al.*, 2016).

Como se pode observar na FIGURA 2.9, menos de 32% dos estudos revisados realizaram levantamentos de campo para a validação dos mapas de trafegabilidade de viaturas ou para a coleta de informações *in loco*. Por conseguinte, mais de dois terços dos estudos (68,89%) carecem de um viés prático e de validação, estando ligados à modelagem teórica da trafegabilidade.

FIGURA 2.9 – LEVANTAMENTOS DE CAMPO REALIZADOS NOS ESTUDOS REVISADOS.

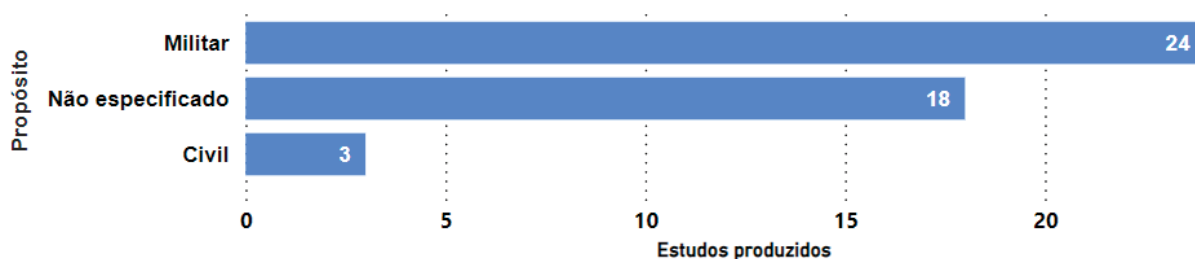


2.6.5 Campos de aplicação

Verificou-se o real propósito dos autores em seus estudos, constatando-se que apenas três trabalhos tiveram fins unicamente civis, 18 tiveram propósitos não especificados (gerais), e a maior parte (24 estudos) foram voltados para a área militar (FIGURA 2.10). Por conseguinte, infere-se um grande interesse da comunidade acadêmica em publicações sobre mapas de trafegabilidade de viaturas voltados para a área bélica. Contudo, não se pode afirmar que haja um maior interesse dos autores na análise da trafegabilidade – objeto de estudo que engloba os mapas de trafegabilidade de viaturas – voltados à área militar, uma vez que na pesquisa bibliográfica realizada foram utilizados termos-chaves que restringiram e conduziram aos estudos revisados de interesse.

Destaca-se que se encontram presentes na literatura científica diversas publicações sobre a trafegabilidade na área de Engenharia Agrícola, Engenharia Mecânica, Engenharia Agrônômica e Agronomia, por exemplo, para aplicação na mecanização da agropecuária. Também, ressaltam-se as aplicações na Ciência Florestal, Dasonomia e Silvicultura, como consequência das atividades de colheita, corte e arraste florestal. As publicações dessas áreas não foram analisadas, pois fugiram do escopo deste estudo, com exceção daquelas que apresentaram como resultado (intermediário ou final) a elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas.

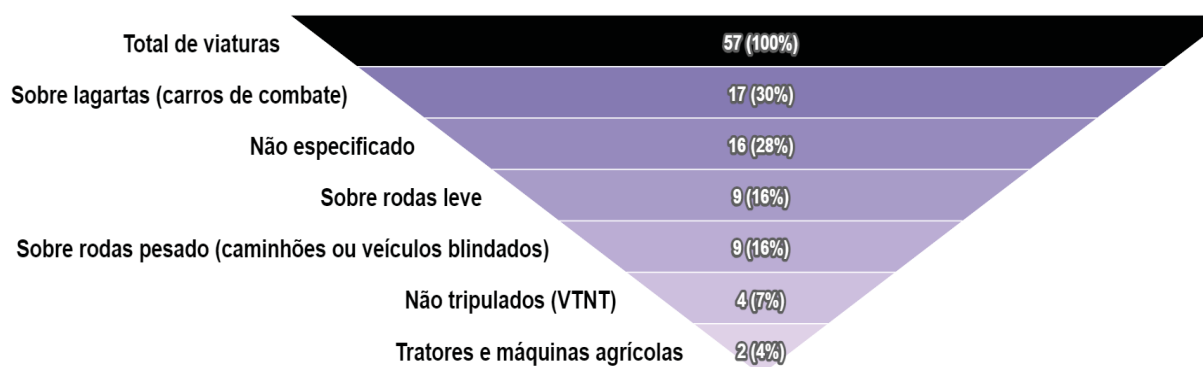
FIGURA 2.10 – CAMPOS DE APLICAÇÃO DOS MAPAS DE TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS.



2.6.6 Tipos de viaturas analisadas

Quanto às viaturas analisadas, foram citadas nos estudos revisados um total de 57, sendo 41 específicas e 16 não especificadas (genéricas). Era de se esperar, em vista da maior parte dos trabalhos voltados para a área bélica, que as viaturas escolhidas para teste e posterior elaboração dos mapas de trafegabilidade de viaturas fossem militares, o que pode ser constatado na FIGURA 2.11. A maioria dessas viaturas foram as sobre lagartas (17 unidades), que possuem maior aptidão para deslocamentos fora de estrada, devido à presença das esteiras rolantes sobre as rodas, o que aumenta a superfície de contato e aderência com o solo, além da alta potência e torque produzidos pelos seus motores.

FIGURA 2.11 – QUANTIDADE DE VIATURAS POR TIPO ANALISADAS NOS ESTUDOS REVISADOS.

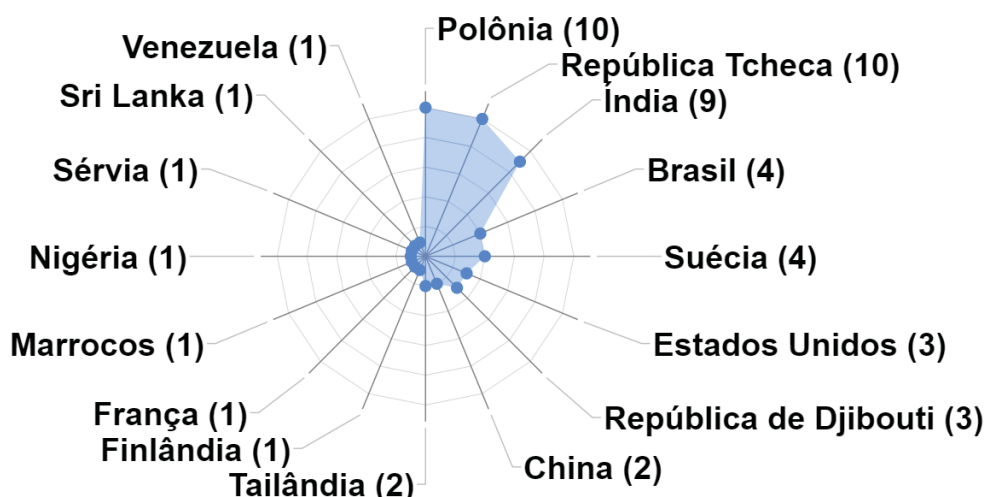


Destacam-se também os tratores e máquinas agrícolas que, apesar de verificados apenas dois exemplares (4%), dada a importância econômica atual do agronegócio no Brasil, podem ser de maior interesse como objeto de pesquisas futuras que visem à elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas para áreas agrícolas. Igualmente, os estudos específicos para mapas de trafegabilidade de VTNT, totalizando apenas quatro (7%), possuem um grande potencial de crescimento pelo interesse atual, civil e militar, em veículos não tripulados.

2.6.7 Considerações quanto ao recorte espacial

Na FIGURA 2.12, é possível observar o quantitativo de áreas de estudo por país de sua localização. Nos 45 estudos revisados, foram utilizadas 54 diferentes áreas, distribuídas por 16 países. O Brasil apresentou um quantitativo de apenas quatro desse total, o que perfaz menos de 8%. Acrescenta-se que países relativamente pequenos, como Polônia e República Tcheca (menos de 5% da extensão territorial do Brasil), tiveram juntos cinco vezes mais áreas estudadas, o que sugere a menor importância dada aos trabalhos para elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas no Brasil.

FIGURA 2.12 – QUANTITATIVO DE ÁREAS DE ESTUDO SOBRE MAPAS DE TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS DESENVOLVIDOS EM DIFERENTES PAÍSES.



No Brasil, as áreas de estudo dos trabalhos revisados se deram no Campo de Instrução de Artilharia de Mísseis e Foguetes do Exército Brasileiro, sediado em Formosa, Goiás (OLIVEIRA, 2006); na área de zoneamento climático para o cultivo de café (coordenadas geográficas 22° 51' 50" a 24° 76' 70" de latitude sul e 49° 55' 30" a 54° 34' 20" de longitude oeste) (HÖFIG; ARAUJO-JUNIOR, 2015); porção da Bacia do Alto Iguaçu, norte do Município de Araucária, Paraná (TORREALBA, 2015); bem como em Rosário do Sul, Rio Grande do Sul (VELOZA, 2020). Na América Latina, foi verificada ainda uma área de estudo na Bacia Hidrográfica do Lago de Maracaibo, Venezuela (PARTIDA, 2017). No restante do mundo, as áreas de estudo se localizam conforme disposto no QUADRO 2.9.

QUADRO 2.9 – ÁREAS DE ESTUDO EM DIFERENTES PAÍSES UTILIZADAS NOS ESTUDOS REVISADOS, EXCETO AMÉRICA LATINA.

Autor(es)	Área de estudo	País
Pundir e Garg (2020a)	Roorkee	Índia
Pundir e Garg (2020b); e Pundir e Garg (2022)	Jaisalmer e Abohar	
Pundir e Garg (2021)	Roorkee e Saharanpur	
Khan, Kashif e Shah (2021)	Pathankot	
Sadiya, James e Oladiti (2017)	Adamawa, Borno e Yobe	Nigéria
Gumos (2005)	Condado de Ostergotland	Suécia
Pokonieczny e Rybansky (2018)	Província de Olomouc	República Tcheca
Hubacek <i>et al.</i> (2014); e Hubacek <i>et al.</i> (2016)	Área militar	
Rybansky <i>et al.</i> (2014)	Brezina	
Rybansky <i>et al.</i> (2015)	Brezina e Libava	
Hofmann <i>et al.</i> (2014)	Brno	
Rada, Rybansky e Dohnal (2020); e Rada, Rybansky e Dohnal (2021)	Floresta de Bacetín	
Pokonieczny e Borkowska (2019)	Universidade Militar de Tecnologia (<i>Military University of Technology – MUT</i>)	Polônia
Pokonieczny (2018a); Pokonieczny (2018b); Pokonieczny (2020); e Pokonieczny e Moscicka (2018)	Corredor de Suwalki	
Pokonieczny (2017); Pokonieczny (2018c); Pokonieczny (2022); Pokonieczny e Dawid (2023); e Pokonieczny, Dawid e Borkowska (2021)	Região Nordeste da Polônia	
Grandjean e Angelliaume (2009)	Dois recortes espaciais	França e Marrocos
Pimpa (2012); e Pimpa, Sarapirome e Dasananda (2014)	Distrito de Mae Sot	Tailândia
Potic <i>et al.</i> (2024)	Assentamentos de Piro, Bela Palanka, Babusnica e Dimitrovgrad	Sérvia
Suvinen (2006)	Recorte espacial	Finlândia
Flores, Entekhabi e Bras (2014)	Bacia Hidrográfica Experimental Walnut Gulch (<i>Walnut Gulch Experimental Watershed – WGEW</i>)	Estados Unidos
Grogan (2009)	Condado de Pima, Arizona	
Rehrer, Griffin e Renner (2022)	Recorte espacial	
Kalugamuwa, Dinusha e Sandamali (2020)	Distrito de Kalutara	Sri Lanka
Wicander (2018)	Kalix, Vasteras e Skane	Suécia e República Tcheca
Hua <i>et al.</i> (2023); e Hua <i>et al.</i> (2024)	Recorte espacial	China
He <i>et al.</i> (2023)	Três recortes espaciais	República de Djibouti

2.6.8 Métodos de inferência espacial

Para a integração das camadas de informação, os autores utilizaram-se de diferentes métodos de inferência espacial, os quais se encontram expostos no QUADRO 2.10.

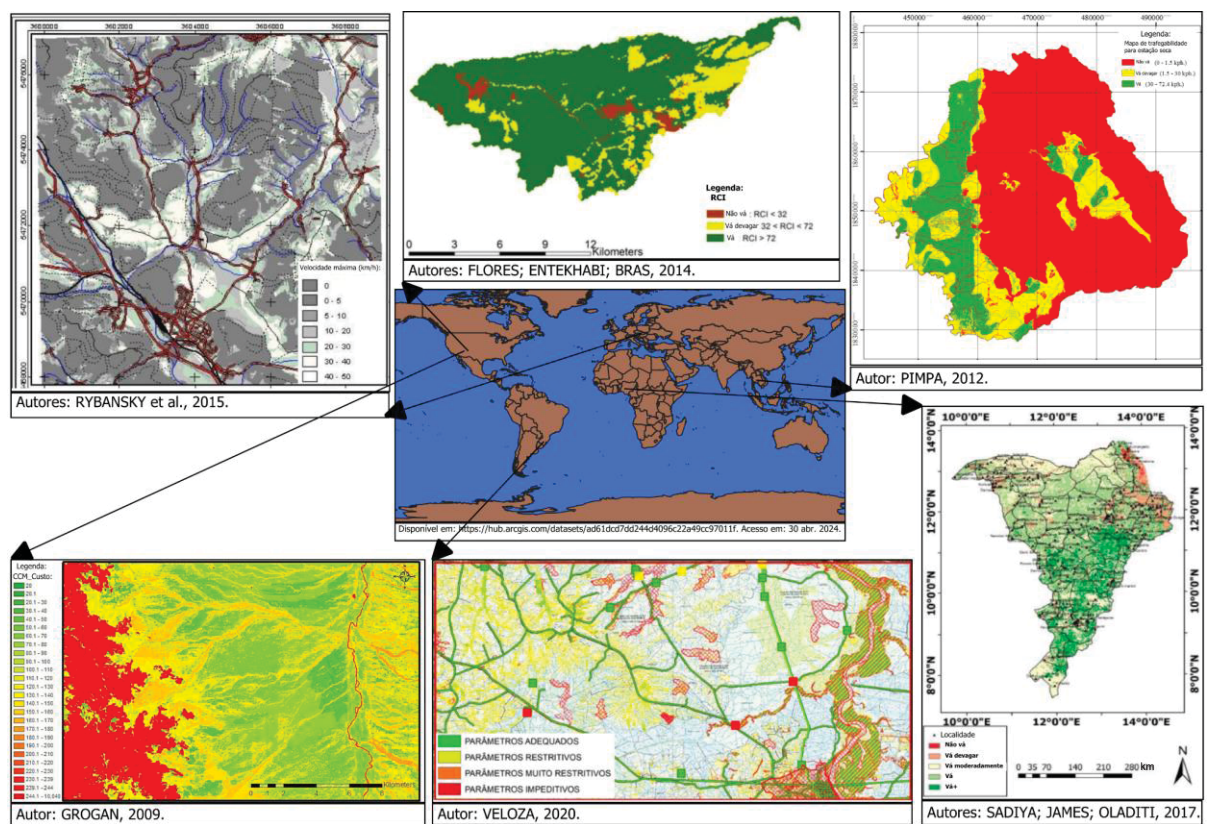
QUADRO 2.10 – MÉTODOS DE INFERÊNCIA ESPACIAL EMPREGADOS PARA A INTEGRAÇÃO DE DIFERENTES CAMADAS DE INFORMAÇÃO.

Autor(es)	Método
Flores, Entekhabi e Bras (2014)	Simulação de Monte Carlo; filtro de Kalman.
Grandjean e Angelliaume (2009)	Sistema de tomada de decisão ECORS.
Gumos (2005) ¹ ; He <i>et al.</i> (2023) ¹ ; Khan, Kashif e Shah (2021) ¹ ; e Potic <i>et al.</i> (2024) ²	MCDA pelo AHP ¹ ou pela Análise de Sobreposição Ponderada (<i>Weighted Overlay Analysis</i> – WOA) ² .
Hestera e Pahernik (2018) ³ ; Höfig e Araujo-Junior (2015) ³ ; Kalugamuwa, Dinusha e Sandamali (2020) ³ ; Pimpa (2012) ⁴ ; Pimpa, Sarapirome e Dasananda (2014) ⁴ ; Rada, Rybansky e Dohnal (2020) ⁵ ; e Rehner, Griffin e Renner (2022) ⁴	Álgebra de mapas: soma e reclassificação ³ ; multiplicação de fatores calculados a partir de camadas de informação ⁴ ; aplicação de fórmula matemática e reclassificação ⁵ .
Hofmann <i>et al.</i> (2014); Hubacek <i>et al.</i> (2014); e Hubacek <i>et al.</i> (2016)	Lógica Fuzzy.
Hua <i>et al.</i> (2023); Hua <i>et al.</i> (2024); e Pokonieczny (2018c)	Rede Neural Artificial (RNA, do tipo <i>Multilayer Perceptron</i> – MLP).
Partida (2017)	Sistema Baseado em Regras (SBR); álgebra de mapas (multiplicação dos valores das células das camadas de informação).
Pundir e Garg (2020b); Suvinen (2006); e Torrealba (2015)	SBR.
Pokonieczny, Dawid e Borkowska (2021); e Pokonieczny e Dawid (2023)	RNA (do tipo MLP); Índice de Mobilidade (<i>Index of Passability</i> – IOP); e MCDA.
Grogan (2009) ⁶ ; Pokonieczny (2017) ⁷ ; Pokonieczny (2018a) ⁷ ; Pokonieczny (2018b) ⁷ ; Pokonieczny (2020) ⁷ ; Pokonieczny (2022) ⁷ ; Pokonieczny e Borkowska (2019) ⁷ ; Pokonieczny e Moscicka (2018) ⁷ ; Pokonieczny e Rybansky (2018) ⁷ ; Pundir e Garg (2020a) ⁸ ; Rybansky <i>et al.</i> (2014) ⁹ ; Rybansky <i>et al.</i> (2015) ⁹ ; e Wicander (2018) ⁹	Atribuição de valores de custo ⁶ / IOP ⁷ / pesos ⁸ / coeficiente de desaceleração ⁹ para as classes de cada uma das camadas de informação; e posterior soma ponderada desses valores para cada célula.
Pundir e Garg (2021); e Pundir e Garg (2022)	Regressão espacial.
Rada, Rybansky e Dohnal (2021); e Rybansky (2007)	Análise comparativa com valores padronizados na literatura especializada.
Oliveira (2006); Sadiya, James e Oladiti (2017); e Veloza (2020)	Reclassificação; sobreposição ponderada das camadas de informação.

2.6.9 Formas de apresentação de restrições à trafegabilidade

Exemplares de mapas de trafegabilidade de viaturas elaborados pelos autores revisados podem ser verificados na FIGURA 2.13. Esses mapas constituem-se em importantes instrumentos de apoio ao planejamento e à tomada de decisão, pois fornecem as restrições à trafegabilidade em uma determinada área por meio da integração entre as camadas de informação influentes no fenômeno.

FIGURA 2.13 – EXEMPLOS DE MAPAS DE TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS ELABORADOS PELOS AUTORES REVISADOS.



Alguns estudos realizaram a classificação baseada em classes discretas, em duas classes, a exemplo de vá (*go*) e não vá (*no go*) (HUBACEK *et al.*, 2016) e bom (*good*) e difícil (*difficult*) (PUNDIR; GARG, 2022); e em três níveis básicos, vá (*go*), vá devagar (*slow go*) e não vá (*no go*) (FLORES; ENTEKHABI; BRAS, 2014; GRANDJEAN; ANGELLIAUME, 2009; KALUGAMUWA; DINUSHA; SANDAMALI, 2020; PIMPA, 2012; PIMPA; SARAPIROME; DASANANDA, 2014; POKONIECZNY; BORKOWSKA, 2019; POKONIECZNY; DAWID, 2023; RADA; RYBANSKY; DOHNAL, 2020; RADA; RYBANSKY; DOHNAL, 2021; RYBANSKY, 2007; WICANDER, 2018),

terreno transitável, transitável com restrições ou intransitável (HOFMANN *et al.*, 2014), bom (*good*), restrito (*restricted*) e difícil (*difficult*) (PUNDIR; GARG, 2020b) e terreno impeditivo (totalmente desfavorável), restritivo (limitativo, com velocidade reduzida pela maior cautela necessária) e adequado (sem limitações) (OLIVEIRA, 2006).

Ainda sobre a classificação em classes discretas, observou-se também o uso de quatro classes, sendo adequada, restritiva, muito restritiva e impeditiva (TORREALBA, 2015; VELOZA, 2020), ou então, vá (*go*), vá devagar (*slow go*), não vá (*no go*) e não vá+ (*no go+*) (HUBACEK *et al.*, 2014), ou ainda, ida boa (*good going*), ida restrita (*restricted going*), ida muito restrita (*restricted going+*) e ida difícil (*difficult going*) (HE *et al.*, 2023); cinco classes, não vá (*no-go*), vá muito devagar (*very slow-go*), vá devagar (*slow-go*), vá (*go*) e restrito (*restricted*) (KHAN; KASHIF; SHAH, 2021) e ótima, adequada, restritiva, muito restritiva e impeditiva (PARTIDA, 2017); nove diferentes classes, sendo excelente (*excellent*), muito bom (*very good*), bom (*good*), difícil (*difficult*), médio (*medium*), baixo (*low*), muito baixo (*very low*), restrito com atenção (*restricted with caution*) e restrito (*restricted*) (PUNDIR; GARG, 2020a); 10 classes, em intervalo discreto de 1 a 10 (POKONIECZNY, 2018b); e 26 classes, com emprego de um degradê de cores, da menor para a maior restrição (GROGAN, 2009).

Outros autores optaram por utilizar uma classificação em intervalos contínuos, a fim de melhor caracterizar as fronteiras entre as diferentes classes de restrições à trafegabilidade de viaturas. Esses autores partiram da premissa de que a transição entre classes não ocorre abruptamente em ambiente natural, havendo normalmente uma zona de transição entre a área adequada à trafegabilidade e áreas impeditivas. Nesse grupo, a classificação foi realizada por meio de uma gradação de cores, sendo 1 o terreno transitável (*go terrain*), decrescendo até zero, correspondente ao terreno intransponível (*no go terrain*) (POKONIECZNY, 2017; POKONIECZNY, 2018a; POKONIECZNY, 2018c; POKONIECZNY, 2020; POKONIECZNY, 2022; POKONIECZNY; DAWID; BORKOWSKA, 2021; POKONIECZNY; MOSCICKA, 2018); ou então, por meio de cinco mapas de trafegabilidade de viaturas, com diferentes resoluções espaciais (POKONIECZNY; RYBANSKY, 2018); através de paleta de cores harmônica, variável de acordo com a velocidade de tráfego, entre 0 e 50 km/h (HUA *et al.*, 2023; RYBANSKY *et al.*, 2014; RYBANSKY *et al.*, 2015), entre 0 e 40 km/h (HUA *et al.*, 2024) e conforme a possível velocidade de tráfego, sendo ≤ 3 km/h (extremamente restrito), 3-10 km/h (muito restrito), 10-30 km/h (restrito), 30-55 km/h (pouco restrito) e 55-110 km/h (adequado) (REHRER; GRIFFIN; RENNER, 2022).

Também, verificaram-se estudos que optaram por uma abordagem mista, com classes discretas e contínuas, graduadas de 0,01 (menor restrição) até 2,25 (maior restrição), bem como mapeando-se áreas impeditivas (*no go*) (GUMOS, 2005); e cinco classes numeradas de 1 a 5, em que 1 representa os locais de trafegabilidade mais lentos, e 5 os mais rápidos, e classificação variando entre outras cinco classes: não vá (*no go*), vá devagar (*go slow*), vá moderadamente (*moderate go*), vá (*go*), vá+ (*go+*) (SADIYA; JAMES; OLADITI, 2017).

Quando aplicados à agricultura, os mapas de trafegabilidade de viaturas podem ser entendidos como mapas de potencialidade à mecanização agrícola, utilizando-se um total de quatro classes relativas à mobilidade de máquinas agrícolas: extremamente apta, muito apta, apta e não recomendada (HÖFIG; ARAUJO-JUNIOR, 2015).

2.6.10 Síntese da revisão

A avaliação da trafegabilidade fundamenta-se na análise da interação entre a viatura e o terreno, sendo a trafegabilidade limitada e afetada por diversos fatores ligados ao terreno, como sua morfologia, presença de obstáculos ou feições construídas pelo homem etc. Nesse contexto, os mapas de trafegabilidade de viaturas representam instrumentos auxiliares ao planejamento e tomada de decisão, o que pode representar menores contratempos, como não se conseguir atingir o destino, problemas de atolamento ou acidentes com riscos de perdas materiais ou humanas.

Há dois grupos que podem se beneficiar da utilização dos mapas de trafegabilidade de viaturas: os militares (Forças Armadas e auxiliares) e os civis (órgãos e entidades públicas ou privadas). Entre as diferenças desses grupos, destaca-se na esfera militar ser necessária a verificação rápida da trafegabilidade durante ações militares de defesa do território nacional, muitas vezes optando-se por não utilizar a malha viária por questões de sigilo das operações contra o(s) inimigo(s).

Na esfera civil, normalmente há uma escolha natural em utilizar a malha viária. Contudo, em situações adversas, pode haver a necessidade de realizar deslocamentos fora de estrada. Nesses casos, é esperado que haja um planejamento do deslocamento a ser realizado, que será tão melhor quanto forem os meios disponíveis com informações sobre a trafegabilidade, possibilitando a tomada de

decisão. Conforme verificado nos estudos analisados, isso pode ser operacionalizado por meio dos mapas de trafegabilidade de viaturas.

Os resultados desta revisão da literatura permitiram verificar que a elaboração dos mapas de trafegabilidade de viaturas envolve o uso de conhecimentos multidisciplinares, essenciais para a compreensão do impacto de diferentes variáveis na trafegabilidade. Em especial, destaca-se o conhecimento das áreas de domínio da Geografia, Ciência e Engenharia dos Solos, Hidrologia, Meteorologia, Mecânica de Automóveis, Pedologia, Cartografia e SR. Não obstante, verificou-se ser possível modelar o fenômeno com emprego de informações obtidas de insumos de solo, relevo, vegetação, feições antrópicas, condições meteorológicas e curso/corpos d'água.

Uma das principais dificuldades encontradas nos estudos revisados está na camada de informação de solos. Isso se deve à sua dinâmica, que sofre forte influência das condições meteorológicas, tornando-se necessário um exame mais cuidadoso, muitas vezes com levantamentos de campo. Por exemplo, um dos métodos mais precisos atualmente para obter informação do solo é a coleta por poços de solo, com posterior estudo laboratorial. Contudo, esse método é relativamente caro, demorado e nem sempre é possível realizá-lo nas áreas de interesse.

Um segundo método, menos preciso, porém de maior eficiência, é o uso de medições penetrométricas com posterior comparação com valores tabelados em manuais pedológicos de referência. O problema na sua aplicação é semelhante ao dos poços de solo, pois necessitam de ida à campo, com um custo financeiro que nem sempre o torna viável. Como alternativa, têm-se os métodos de SR, menos eficazes, mas de alta eficiência, pois permitem cobrir grandes áreas com bons resultados.

Para atingir seus objetivos, os autores revisados procuraram elaborar seus mapas de forma a transmitir aos usuários as restrições à trafegabilidade. Para tanto, alguns dados essenciais foram manipulados, de modo a se obter as camadas de informação. Por meio dessas camadas, sistematicamente integradas por diferentes métodos de inferência espacial, pôde-se chegar aos mapas de trafegabilidade de viaturas. A assertividade desses mapas em representar e modelar corretamente o terreno quanto à trafegabilidade mostrou-se dependente da suficiência e adequação dos insumos disponíveis para se chegar às camadas de informação, bem como do método de inferência espacial empregado para a integração dessas camadas.

3 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

Este capítulo apresenta o método para a elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas e para a automação de rotas entre dois pontos (origem e destino). Para tanto, foram testadas rotas preferenciais, razoáveis e desafiadoras, buscando-se determinar o percurso ótimo (menor custo) entre a origem e o destino. Assim, o método proposto permitiu a determinação de diferentes variantes de rotas: uma mais longa, dita preferencial, que apesar de percorrer maior distância possui o menor custo final acumulado por passar por terrenos mais adequados à trafegabilidade; outra mais curta, dita desafiadora, por normalmente estar associada à superação de obstáculos em terrenos restritivos; e razoável, que visa à ponderação entre distância e dificuldade da trafegabilidade, sendo o meio termo entre a rota preferencial e a desafiadora. A área de estudo, localizada em Santa Catarina (SC), foi delimitada por quinze bacias hidrográficas, que compreendem platôs da Serra Geral, incluindo vales, escarpas e altiplanos da Serra do Corvo Branco, do Cânion do Espraiado, do Campo dos Padres e suas adjacências. As análises foram realizadas com o uso de dados obtidos de diferentes fontes governamentais (públicas), de mapeamento colaborativo e de fontes privadas, todos disponibilizados gratuitamente em repositórios digitais. No método, foram necessários pré-processamentos realizados em SIGs, segmentação e classificação supervisionada com uso de algoritmos de Aprendizado de Máquina e GEOBIA. A integração efetiva das camadas de informação e dados não espacializados foi realizada por meio de MCDA, com emprego do AHP, na plataforma de modelagem *Dinamica* EGO. Nessa plataforma, foram desenvolvidos dois modelos: um para a elaboração dos mapas de trafegabilidade de viaturas e outro para a automação de rotas. A validação desses modelos foi realizada por meio de dados coletados em levantamento de campo, imagens de séries temporais do Google *Earth* PRO e ortofotos aéreas de altíssima resolução espacial (0,39 m) provenientes do Projeto de Mapeamento do Estado de Santa Catarina 2010-2012, sendo verificado que ambos os modelos apresentaram resultados promissores.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

Como estudo de caso para o método proposto de elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas e automação de rotas, foi designada uma área de estudo em Santa Catarina (SC), que se encontra totalmente compreendida no Bioma Mata Atlântica (FIGURA 3.1), nos platôs da Serra Geral.

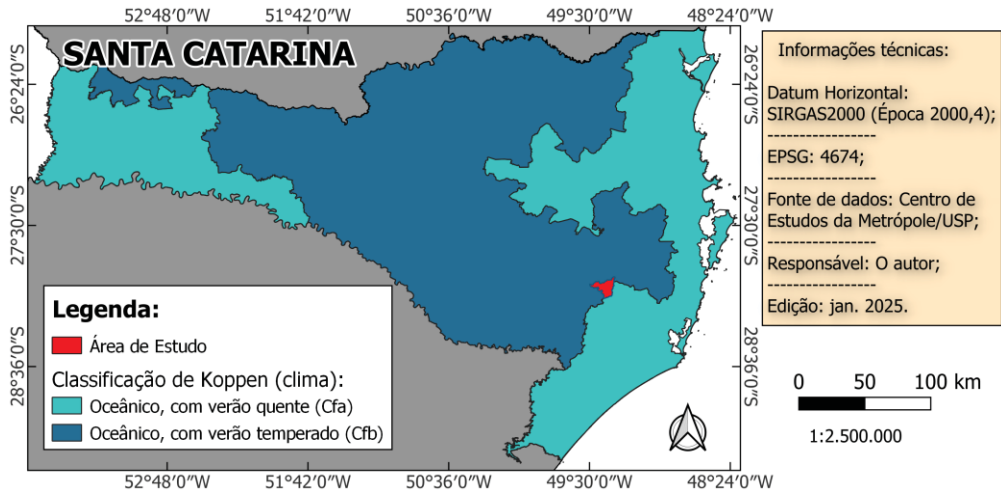
FIGURA 3.1 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO EM MAPA DE BIOMAS BRASILEIROS.



Essa área de estudo possui 16.285,58 ha e foi definida por meio de 15 ottobacias nível sete, da Base Hidrográfica Ottocodificada (BHO) 2017 (ANA, 2022): 8299966, 8299964, 8299968 e 8299969 (microbacia do Rio Santa Fé); 8299995, 8299997, 8299996, 8299998, 8299994 e 8299999 (microbacia do Rio Canoas); 7956898 e 7956899 (microbacia do Rio Espraiado); e 8299925, 8299926 e 8299929 (microbacia do Rio dos Bugres).

Conforme classificação climática de Koppen (FIGURA 3.2), essa área está localizada na zona subtropical úmida, em uma região de transição entre o clima oceânico temperado (Cfb) – verão ameno (temperatura média do mês mais quente não chega a 22°C), chuvas uniformemente distribuídas sem estação seca e precipitação anual de 1.100 a 2.000 mm – e o clima oceânico (Cfa) – verão quente e mais de 30 mm de precipitação no mês mais seco (ALVARES *et al.*, 2013).

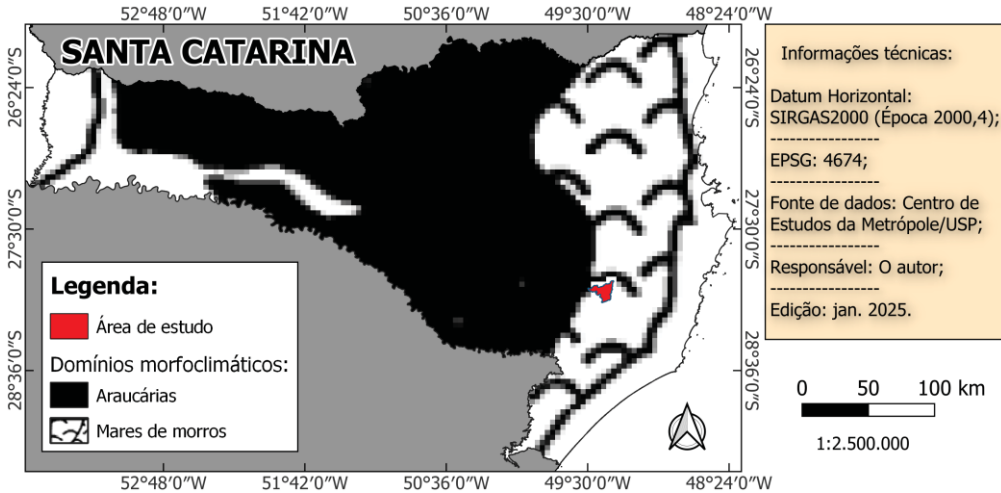
FIGURA 3.2 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO EM MAPA CLIMÁTICO DO ESTADO DE SANTA CATARINA CONFORME CLASSIFICAÇÃO DE KOPPEN.



FONTE: Adaptado de CEM (2021).

Por seu turno, conforme classificação morfoclimática de Ab’Sáber (FIGURA 3.3), a área de estudo está totalmente compreendida no domínio de Mares de Morros, caracterizado pelos planaltos e serras erodidas pelo alto volume de precipitação anual e pela disposição ao longo da costa brasileira (AB’SÁBER, 2003).

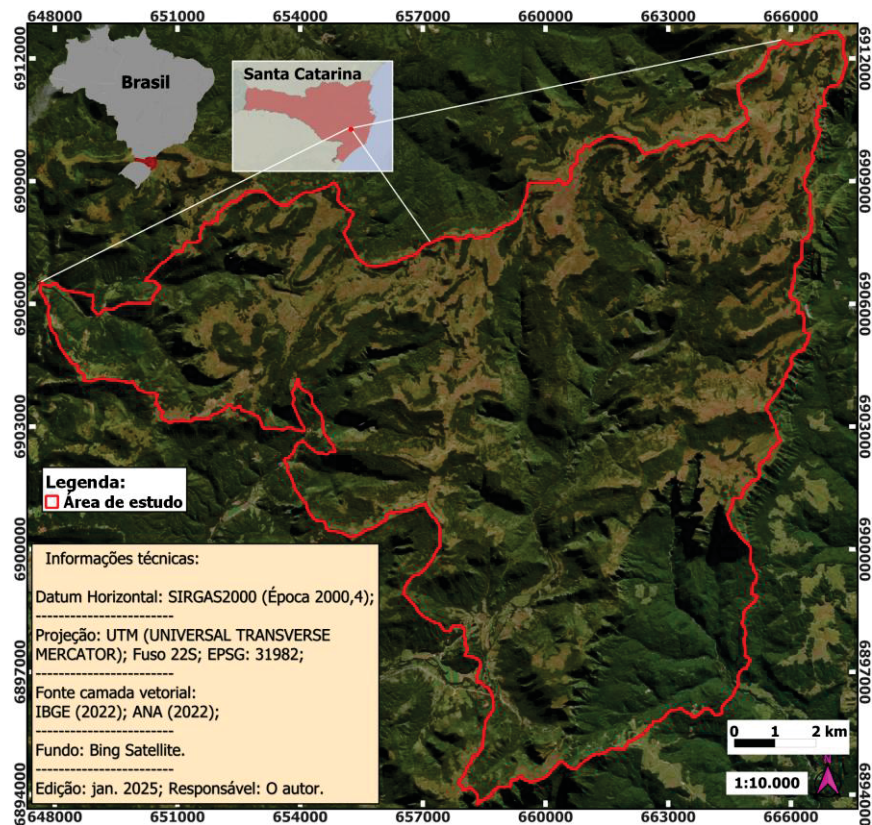
FIGURA 3.3 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO EM MAPA DE DOMÍNIO MORFOCLIMÁTICO DO ESTADO DE SANTA CATARINA CONFORME CLASSIFICAÇÃO DE AB’SÁBER.



FONTE: Adaptado de Ab’Sáber (2003).

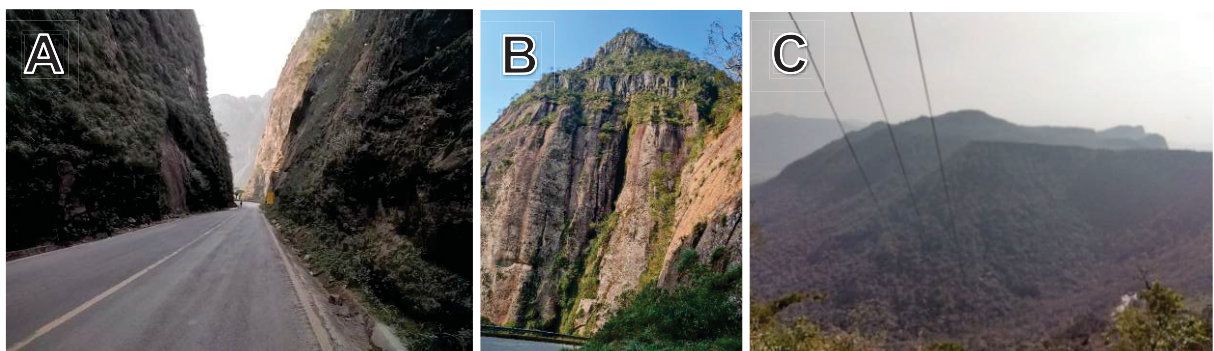
Mais especificamente, a área de estudo (FIGURA 3.4) compreende parte da Serra do Corvo Branco (FIGURA 3.5), Campo dos Padres, contemplando baixadas e altiplanos com campos nativos, abrangendo uma parcela dos Municípios de Grão-Pará/SC e Urubici/SC.

FIGURA 3.4 – ÁREA DE ESTUDO. REGIÃO DA SERRA DO CORVO BRANCO, CÂNION DO ESPRAIADO, CAMPO DOS PADRES E ADJACÊNCIAS.



Estrategicamente, essa região é importante por fortalecer o turismo nos Municípios de Grão-Pará/SC e Urubici/SC, visitados por grupos de aventureiros de diferentes modalidades, como os jipeiros, que buscam a região atraídos pelas grandes dificuldades impostas pelo terreno à trafegabilidade de viaturas (RSOFFROAD, 2024). Assim, essa área pode ser considerada difícil para a trafegabilidade, devido à heterogeneidade da superfície e aos obstáculos naturais presentes, o que a torna um cenário ideal para a consecução dos objetivos deste estudo.

FIGURA 3.5 – INÍCIO DA DESCIDA DA SERRA DO CORVO BRANCO (A), FACE NOROESTE DE MORRO NA SERRA DO CORVO BRANCO (B) E VISTA NORTE NO ALTOS DO CORVO BRANCO (C).



Trata-se de uma região caracterizada por uma paisagem diversificada, abrangendo um grande curso d'água (Rio Canoas, FIGURA 3.6); cânions, entre eles o do Espraiado e áreas adjacentes (FIGURA 3.7); cachoeiras, como a do Rio dos Bugres e do Rio Bonin (FIGURA 3.8); bem como grandes áreas florestais (vegetação densa, arbustiva e parques). A parte sul contém áreas de agricultura e pecuária. Há uma variação de altitude entre 397 m e 1.827 m, sendo a região composta por um relevo acidentado e aplainado, que contém o ponto mais alto de Santa Catarina: Morro da Boa Vista (1.827 m de altitude) (SECOM, 2014).

FIGURA 3.6 – RIO CANOAS.



FIGURA 3.7 – REGIÃO DO ESPRAIADO, CARACTERIZADO POR ALTAS ALTITUDES E FORMAÇÕES DE CÂNIOS (A), VISTA NORDESTE DA MONTANHA INFINITA (B), INÍCIO DAS TRILHAS (C) E VISTA SUL PARA O CÂNION DO ESPRAIADO (D).



FIGURA 3.8 – CACHOEIRA DO RIO DOS BUGRES (A), CACHOEIRA DO RIO BONIN (B) E VISTA OESTE DO CÂNION DO RIO DOS BUGRES (C).



3.2 MATERIAL E MÉTODOS

Esta seção apresenta o material utilizado e os métodos adotados para a elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas e para a automação de rotas. Para tanto, o método foi dividido em duas etapas principais: a elaboração do mapa de trafegabilidade de viaturas com uso de MCDA pelo AHP; e a automação de rotas a partir de um ponto origem até o destino com emprego do algoritmo roteador de Dijkstra.

3.2.1 Dados utilizados

A fim de se encontrar insumos livres úteis a este estudo, foi realizada uma ampla pesquisa nos bancos de dados constantes de repositórios digitais de todos os estados brasileiros e do Distrito Federal (DF). Nessa pesquisa, observou-se que apenas cinco das 27 unidades federativas (aproximadamente 18%) possuem atualmente insumos liberados gratuitamente para os usuários e disponibilizados em repositórios digitais (QUADRO 3.1).

QUADRO 3.1 – INSUMOS DE LEVANTAMENTOS DE ALTA/ALTÍSSIMA RESOLUÇÃO ESPACIAL.

Unidade da Federação	Insumos disponibilizados aos usuários?	Tipo de insumo e resolução espacial
Bahia	Sim (BAHIA, 2025)	a. Levantamento aerofotogramétrico 2010-2014: 1. Ortofotomosaico RGB (0,8 m); e 2. Camadas vetoriais 1:25.000. b. Ortoimagens <i>RapidEye</i> 2009-2010 (5 m).
Espírito Santo	Sim (ESPÍRITO SANTO, 2024)	a. Levantamento aerofotogramétrico 2007-2008: 1. Ortofotomosaico RGB (1 m); 2. MDS (2 m) e MDT (2 m). b. Levantamento aerofotogramétrico 2012-2015: 1. Ortofotomosaico RGB (0,5 m); 2. MDS (2 m) e MDT (2 m). c. Ortoimagens KOMPSAT 3/3A 2019-2020 (0,5 m).
Pernambuco	Sim (PERNAMBUCO, 2016)	Levantamento aerofotogramétrico 2010-2011: 1. Ortofotomosaico RGB (0,5 m); 2. MDS (1 m) e MDT (1 m).
Santa Catarina	Sim (SANTA CATARINA, 2024)	Levantamento aerofotogramétrico 2010-2012: 1. Ortofotomosaico RGB (0,39 m); 2. MDS (1 m) e MDT (1 m).
São Paulo	Sim (IDEA-SP, 2025)	Insumos disponibilizados por meio da Infraestrutura de dados espaciais DataGEO. Nela, encontram-se disponíveis ortofotos, ortoimagens, MDEs e outros dados em resoluções espaciais diversas.

Os insumos usados neste estudo (TABELA 3.1) foram identificados a partir da literatura revisada e, em especial, do relatório técnico da Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN) (BRADBURY *et al.*, 2018). Além desses dados, foram obtidos em levantamento de campo, no período de 10 a 16 de setembro de 2024, dados para a validação do mapa de trafegabilidade de viaturas e das rotas automatizadas.

Os principais materiais³ empregados nesse levantamento de campo foram os dispostos na FIGURA 3.9. O binóculo Lelong LE-2053 (FIGURA 3.9A) foi utilizado para a observação remota de feições do terreno e obstáculos, permitindo uma avaliação preliminar da trafegabilidade nas áreas de difícil acesso. O drone DJI Air 3 (FIGURA 3.9B) possibilitou o imageamento aéreo de regiões específicas da área de estudo, fornecendo dados complementares de altíssima resolução espacial (5 cm) e possibilitando a identificação de detalhes do terreno.

³ Também, foram utilizados dois *smartphones* para o registro de fotografias, um *tablet* para rastreamento do percurso (*tracking*) e para anotações das observações de campo, garrafa d'água, bolsa térmica, GNSS de navegação, trena, prancheta, lápis, adaptador de tomada veicular, facão, lanternas e Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) – bota, chapéu, óculos de sol, perneira, protetor solar, loções e repelentes de insetos.

Os clinômetros (FIGURA 3.9C/D/E) foram empregados na medição de pontos amostrais de inclinação do terreno, dados fundamentais para a caracterização da declividade e sua influência na trafegabilidade. Por seu turno, a viatura Frontier Diesel 4x4 190CV (FIGURA 3.9F) foi utilizada para os deslocamentos realizados na área de estudo e para a execução de testes práticos de trafegabilidade, permitindo a validação em campo das rotas automatizadas pelo modelo e a comparação entre as restrições à trafegabilidade dispostas no mapa de trafegabilidade de viaturas e as condições reais do terreno. Por conseguinte, esses equipamentos garantiram a aquisição de dados para a otimização e validação dos modelos desenvolvidos neste estudo.

FIGURA 3.9 – PRINCIPAIS MATERIAIS EMPREGADOS EM LEVANTAMENTO DE CAMPO: BINÓCULO LELONG LE-2053 (A); DRONE DJI AIR 3 (B); CLINÔMETROS: DE BOLHA HW300 (C), DIGITAL HAGLOF ECII-D (D) E ANALÓGICO (E); E VIATURA FRONTIER DIESEL 4X4 190CV (F).



TABELA 3.1 – INSUMOS UTILIZADOS NA MODELAGEM DA TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS.

Insumos	Escala / Resolução espacial	Formato	Origem	Responsável / Plataforma de dados	Repositório digital
Precipitação	1.000 m	<i>raster</i>	Série histórica (1970-2000)	<i>WorldClim</i>	https://worldclim.org
Temperatura					
Umidade relativa do ar	Não espacializado		Estação meteorológica automática (INMET A845)	INMET ¹	https://portal.inmet.gov.br
Velocidade média do vento					
Precipitação					
Temperatura					
Ortofotos aéreas	0,39 m	<i>raster</i>	Projeto de Mapeamento de Santa Catarina 2010-2012	Governo de Santa Catarina (SIGSC)	https://sigsc.sc.gov.br
MDT					
1 m					
Hidrografia	1:10.000	vetorial	Mapa de reconhecimento de solos	Embrapa ²	https://www.embrapa.br/solos
Tipo de solo	1:250.000				
Malha viária e edificações	1:10.000		Mapeamento colaborativo e vetorização manual com uso de ortofotos SC 2010-2012 e imagens do Google <i>Earth</i> PRO	OSM, governo de Santa Catarina (SIGSC) e Google <i>Earth</i> PRO	https://www.openstreetmap.org , https://sigsc.sc.gov.br e https://www.google.com/earth/about/versions/
Ortoimagens orbitais	8 m (RGB-NIR) 2 m (PAN)	<i>raster</i>	CBERS 04A-WPM	DGI ³ /INPE ⁴	http://www.dgi.inpe.br/catalogo/explore

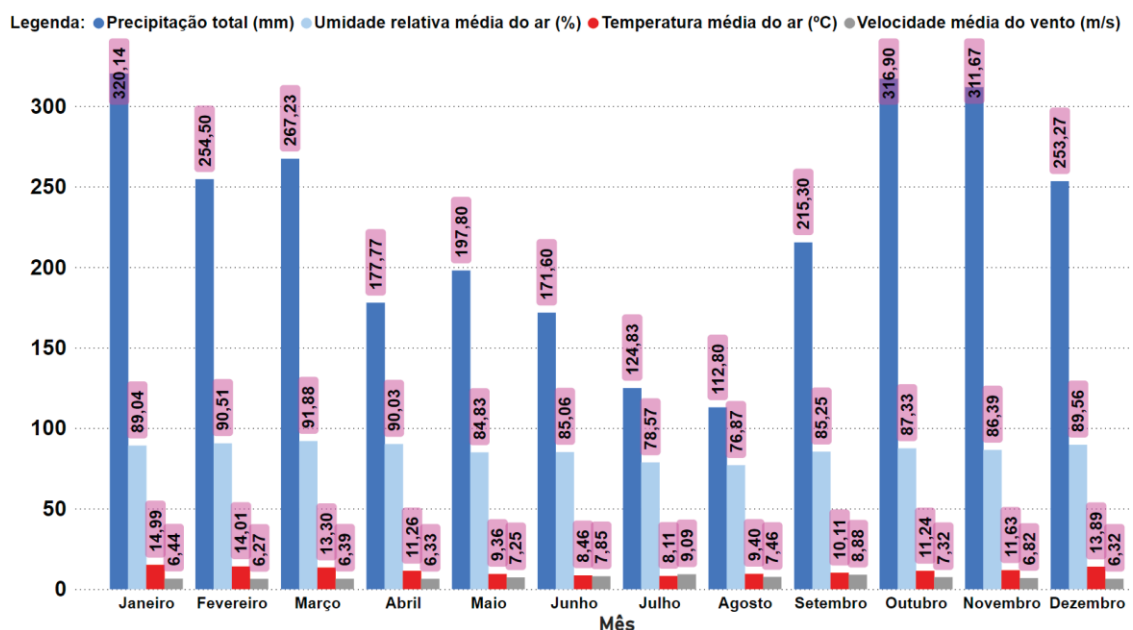
Nota¹: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET);Nota²: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa);Nota³: Divisão de Geração de Imagens (DGI); eNota⁴: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

3.2.1.1 Condições meteorológicas

Para a verificação das condições meteorológicas da área de estudo, foram utilizados os dados provenientes de duas origens distintas: de estação meteorológica automática brasileira e do sistema *WorldClim*. A estação meteorológica automática INMET A845 foi utilizada para a captação de dados de temperatura, precipitação, umidade relativa do ar e velocidade média do vento. Essa estação localiza-se no Morro da Igreja, em Urubici/SC, sendo a mais próxima da área de estudo. Para sua escolha, adotou-se o critério da proximidade, uma vez que áreas mais próximas tendem a possuir características climáticas semelhantes (TOBLER, 1970).

Os dados empregados, referentes a um período de 11 anos (2014 a 2024), foram sintetizados em valores mensais (FIGURA 3.10) de temperatura, precipitação, umidade relativa do ar e velocidade média do vento, com o uso da média como medida de tendência central dos dados. Por seu turno, os dados obtidos pelo sistema *WorldClim* foram apresentados nas FIGURA 3.11 (temperatura) e FIGURA 3.12 (precipitação). Esses dados são referentes a uma série histórica global de 30 anos (1970 a 2000), com valores de temperatura e precipitação espacializados em camadas *rasters* de resolução espacial de aproximadamente 1 km.

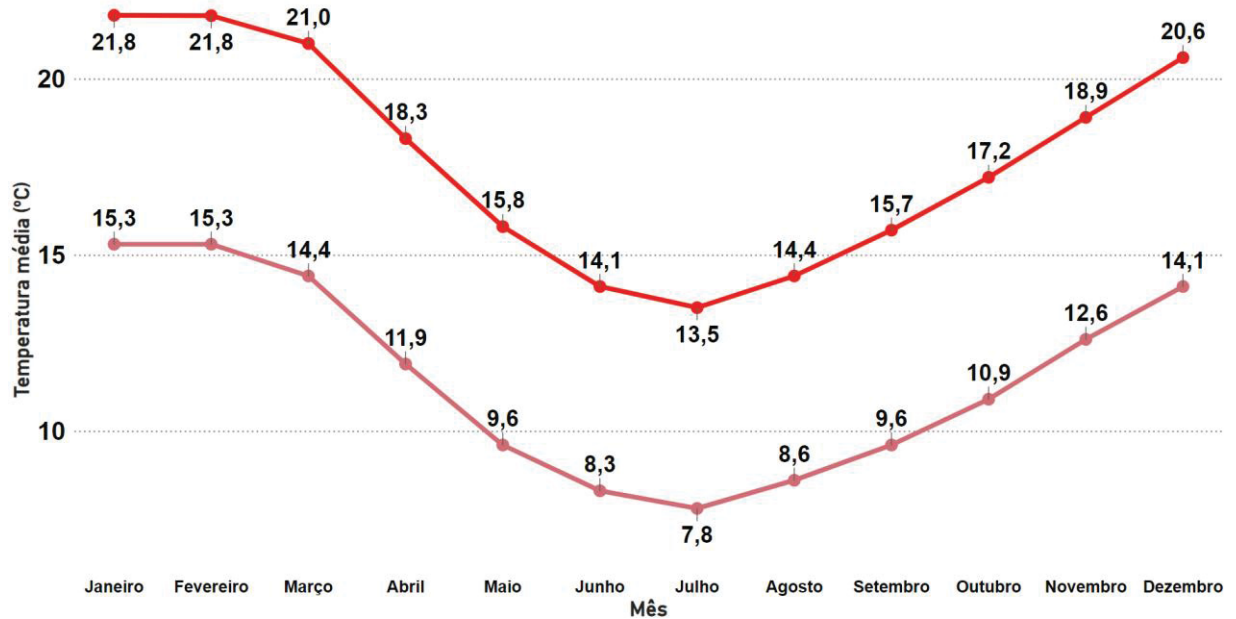
FIGURA 3.10 – DADOS DE TEMPERATURA, PRECIPITAÇÃO, UMIDADE RELATIVA DO AR E VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO DE SÉRIE HISTÓRICA DOS ÚLTIMOS 11 ANOS (2014-2024). RESUMO ESTATÍSTICO (MÉDIA) DOS DADOS COLETADOS PELA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA INMET A845 (BOM JARDIM DA SERRA).



FONTE: Adaptado de INMET (2024).

FIGURA 3.11 – TEMPERATURA ESPERADA PARA A ÁREA DE ESTUDO, OBTIDA POR MEIO DE SÉRIE HISTÓRICA DE DADOS COLETADOS NO PERÍODO DE 1970 A 2000 (WORLDCLIM).

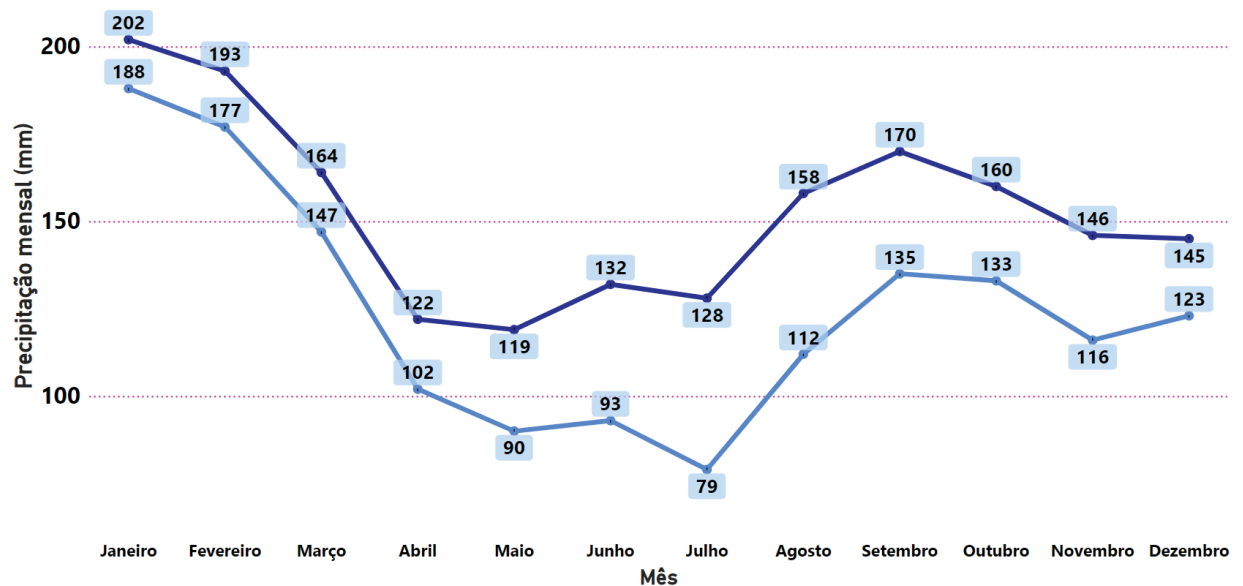
Legenda: ● Temperatura média máxima (°C) ● Temperatura média mínima (°C)



FONTE: Adaptado de Fick e Hijmans (2017).

FIGURA 3.12 – PRECIPITAÇÃO NA ÁREA DE ESTUDO OBTIDA POR MEIO DE SÉRIE HISTÓRICA DE DADOS COLETADOS NO PERÍODO DE 1970 A 2000 (WORLDCLIM).

Legenda: ● Precipitação mínima (mm) ● Precipitação máxima (mm)

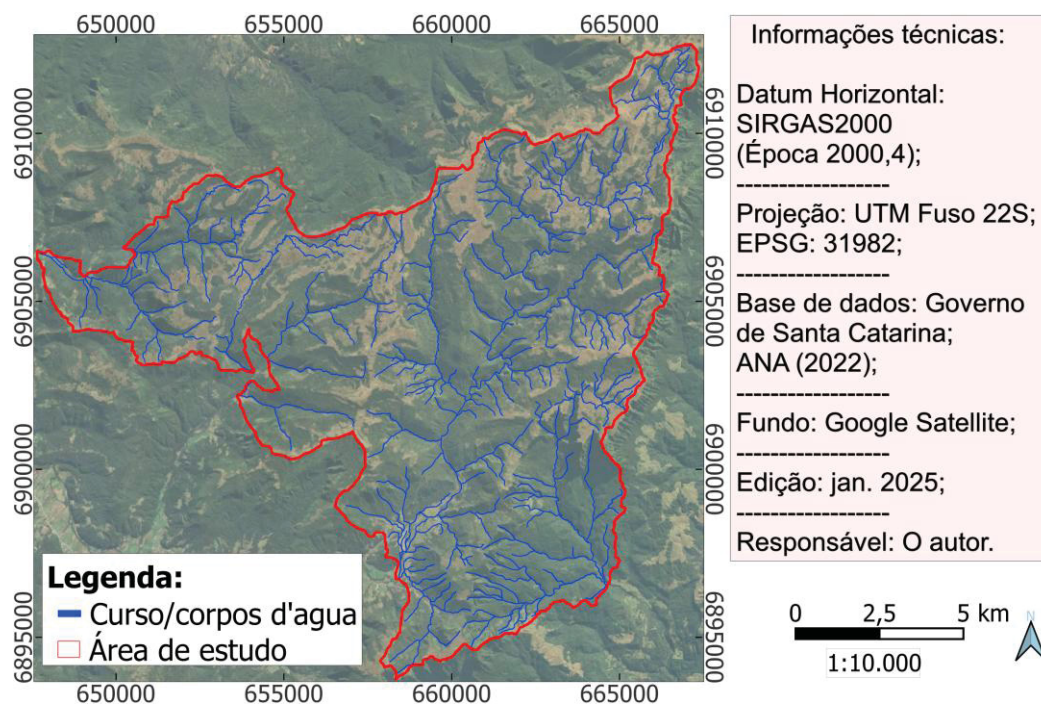


FONTE: Adaptado de Fick e Hijmans (2017).

3.2.1.2 Hidrografia

Para a elaboração da camada de informação de hidrografia (FIGURA 3.13), foram utilizados os dados vetoriais em escala 1:10.000 provenientes do Projeto de Mapeamento de Santa Catarina 2010-2012.

FIGURA 3.13 – CAMADA DE INFORMAÇÃO DE HIDROGRAFIA, FORMADA PELOS CURSOS E CORPOS D'ÁGUA PRESENTES NA ÁREA DE ESTUDO.



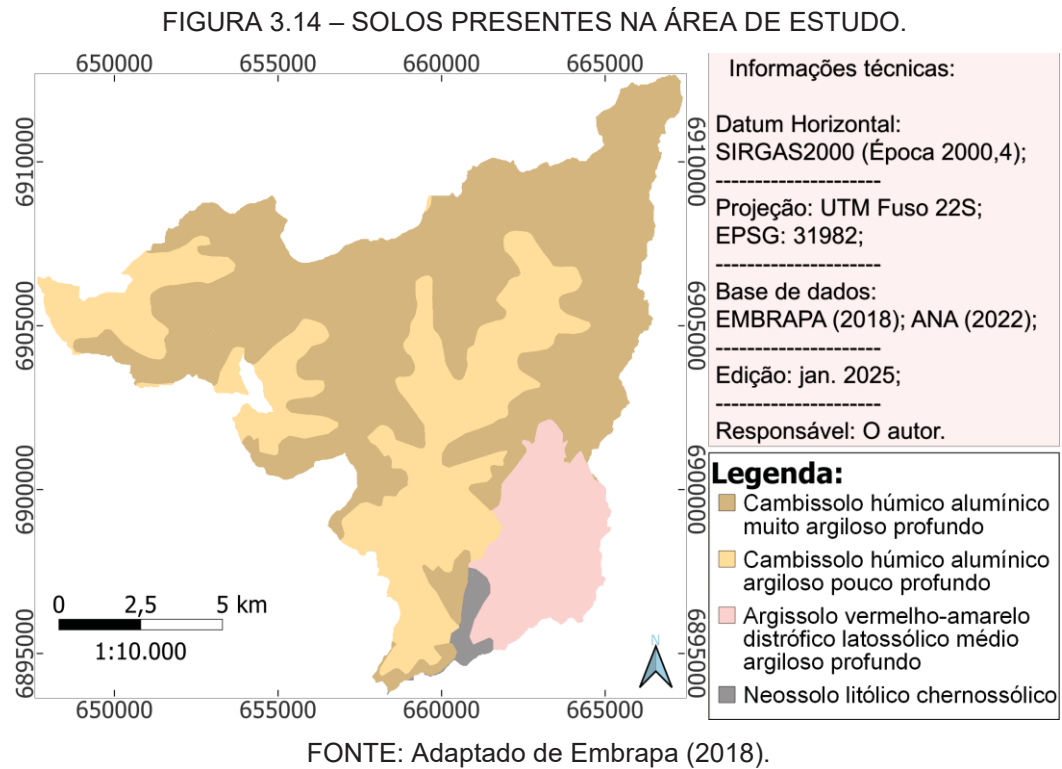
FONTE: Adaptado de SDE (2016).

Esse projeto teve como objetivo principal a restituição da hidrografia com qualidade adequada ao gerenciamento de recursos hídricos do estado. Para tanto, foram utilizados ortofotos RGB e de infravermelho próximo (NIR), MDS, MDT e pontos de apoio de campo. A técnica usada na restituição foi a estereoscopia, e a reambulação ocorreu em duas etapas: em gabinete, baseada em registros do IBGE; e por levantamentos de campo, para a identificação de feições e conferência da completude da rede hidrográfica anteriormente restituída (SDE, 2016).

3.2.1.3 Tipo de solo

Para a obtenção da camada de informação do tipo de solo, foi empregado o insumo proveniente do levantamento de reconhecimento de solos de Santa Catarina,

em formato vetorial, disposto na forma de um mapa de solos (FIGURA 3.14). Na área de estudo, encontram-se presentes os solos do tipo Cambissolo húmico aluminico argiloso com profundidades distintas, Argissolo e Neossolo, especificados de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (EMBRAPA, 2018).



O insumo de tipo de solo é proveniente de levantamentos de reconhecimento de solos realizados nas décadas de 1970 e 1980, disponibilizado em escala 1:250.000 (POTTER *et al.*, 2004). Devido ao nível de generalização associada a essa escala em comparação com as demais camadas de informação de escalas grandes (1:10.000 ou superior) utilizadas neste estudo, foram empregados mecanismos de consideração e tratamento de incertezas descritos na Subseção 3.2.4.3.1.

3.2.1.4 Imagens CBERS 04A-WPM

Os níveis de processamento de imagens CBERS 04A-WPM disponibilizadas no catálogo da DGI/INPE seguem o disposto no QUADRO 3.2. Observa-se que esses níveis são sequenciais, com cada um se baseando no anterior para aplicar correções adicionais e aprimorar os dados.

QUADRO 3.2 – NÍVEIS DE PROCESSAMENTO DAS IMAGENS CBERS 04A-WPM.

Nível	Tratamentos
0 (L0)	Imagem bruta (sem correção).
1 (L1)	Correção radiométrica inicial pelo ajuste da calibração e ganhos do sensor, transformando os dados brutos em radiância. Não inclui correções atmosféricas ou conversão para reflectância.
2 (L2)	Correção radiométrica (com ênfase na correção atmosférica) e geométrica de sistema.
3 (L3)	Refinamento das correções radiométrica e geométrica com uso de pontos de controle na superfície terrestre.
4 (L4)	Imagem ortorretificada e refinada radiométrica e geometricamente por meio de MDT, com ajuste de distorções derivadas da topografia e da plataforma do satélite. Nível de processamento mais avançado para imagens CBERS 04A-WPM.

FONTE: Adaptado de DGI (2021).

As imagens brutas (nível 0, L0) apresentam distorções geométricas importantes, que impossibilitam sua utilização direta para a produção de mapas acurados. Assim, deve-se realizar a correção geométrica e radiométrica das imagens, o que constitui uma etapa imprescindível para a geração de dados com a qualidade geoespacial necessária para a maioria dos trabalhos de mapeamento. Por seu turno, as imagens L4 estão prontas para uso, sem necessidade de procedimentos adicionais por parte dos analistas, com correção radiométrica e geométrica realizadas, além da ortorretificação, o que as torna mais adequadas para a extração de classes de interesse (DGI, 2021).

Por essas características, optou-se por utilizar, neste estudo, imagens CBERS 04A-WPM (TABELA 3.2) em nível de processamento L4 para a obtenção de camadas de informação de uso e cobertura da terra, referentes a diferentes estações do ano: fevereiro (verão), abril (outono), agosto (inverno) e outubro (primavera).

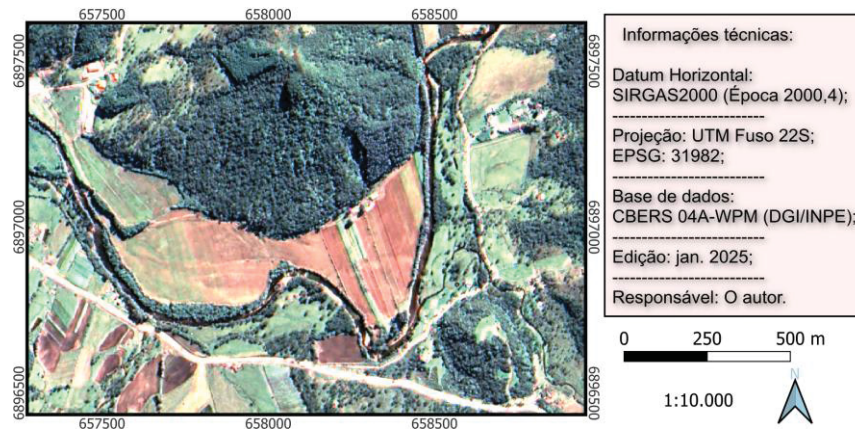
TABELA 3.2 – DADOS DAS IMAGENS CBERS 04A-WPM EMPREGADAS NA OBTENÇÃO DA CAMADA DE INFORMAÇÃO DE USO E COBERTURA DA TERRA.

Ano	mês	ID da cena	Resolução espacial	Path	Row	Formato da imagem
2024	fev.	CBERS4A_WPM20514820240211	PAN: 2 m; e RGB-NIR: 8 m	205	148	GeoTIFF
	abr.	CBERS4A_WPM20414820240418		204		
	ago.	CBERS4A_WPM20514820240815		205		
	out.	CBERS4A_WPM20514820241016		205		

Nessas imagens, as bandas dos espectros RGB-NIR foram combinadas para a formação de uma imagem multibanda colorida. Posteriormente, esta última foi submetida à operação de fusão (*pansharpening*), operacionalizada no GDAL/QGIS

com emprego da banda pancromática e Método Brovey (FLETCHER, 2023). Visou-se, com isso, obter imagens com 2 m de resolução espacial (FIGURA 3.15), para serem empregadas na segmentação e na classificação.

FIGURA 3.15 – RECORTE DE IMAGEM CBERS 04A-WPM FUSIONADA REFERENTE AO MÊS DE FEVEREIRO (ID: CBERS4A_WPM20514820240211).



3.2.2 Plataformas e *softwares*

No decorrer desta pesquisa, foram utilizados:

a) QGIS 3.28.15 e complementos (*OSMDownloader*, *Terminus*, *Orfeo ToolBox* (OTB), *GDAL*, *GRASS* e *SAGA*) para o pré-processamento, segmentação, classificação e demais operações de manipulação de dados e informações geográficas;

b) *Google Earth Pro* para inspeção visual da hidrografia, malha viária, edificações, cercas e muros e como meio auxiliar na classificação e na validação dos produtos cartográficos gerados;

c) *Dinamica Environment for Geoprocessing Objects 7 (Dinamica EGO 7)*⁴ para o desenvolvimento dos modelos de elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas e automação de rotas;

⁴ O *Dinamica EGO*, inicialmente desenvolvido para simular a dinâmica do desmatamento (SOARES-FILHO; CERQUEIRA; PENNACHIN, 2002), tem sido aplicado com sucesso em outros domínios (GARCÍA-ÁLVAREZ *et al.*, 2022). Conforme Espíndola e Fernández (2021), essa plataforma – disponibilizada pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), <www.csr.ufmg.br/dinamica> – tem sido amplamente utilizada pela comunidade científica em diversos estudos que requerem o desenvolvimento de modelos.

d) GPS *logger* para rastreamento das rotas percorridas no terreno e coleta de altitude de pontos em levantamento de campo; e

e) *QField* para coleta e anotação de pontos amostrais em levantamento de campo.

3.2.3 Procedimentos

Na modelagem da trafegabilidade, o componente viatura foi simplificado com considerações restritas ao tipo de rodado, não sendo consideradas características como torque, tração, capacidade de submersão etc. Não obstante, partiu-se da premissa de que serão utilizadas viaturas com características compatíveis com o emprego em deslocamentos fora de estrada.

Por seu turno, o componente motorista não foi incluído na modelagem, por limitações de escopo desta pesquisa, embora se reconheça a sua importância para a determinação do fenômeno. Assim, fatores ligados a ele, como capacidade de condução, capacitações realizadas, habilidades técnicas etc., foram desconsiderados.

Quanto ao componente terreno, enfoque deste estudo, foram verificadas as principais variáveis influenciadoras da trafegabilidade, em especial aquelas obtidas por meio de SR – imagens, MDTs, mapeamento colaborativo e dados hidrológicos, meteorológicos e pedológicos.

Conforme Rose e Clatworthy (2024), mapas de trafegabilidade de viaturas na escala de 1:100.000 provaram ser de uso prático significativo para o planejamento estratégico em operações militares, embora os mapas em escala 1:25.000 (ou maiores) fossem necessários para determinadas áreas e momentos específicos em aplicações no nível operacional.

Com base no estudo de Rose e Clatworthy (2024), foi definida para esta pesquisa a escala de projeto de 1:10.000 para os mapas de trafegabilidade de viaturas. A escolha dessa escala se deve ao atendimento tanto do nível estratégico – autoridades com poderes decisórios em órgãos e entidades públicos ou privados – quanto do nível operacional – normalmente motoristas e equipes – pelo maior detalhamento de informações sobre a trafegabilidade no terreno.

Outra razão dessa escolha encontra-se no fato de que todos os insumos adquiridos em repositórios digitais, exceto o mapa de reconhecimento de solos, atendem a essa escala de projeto. Também, verifica-se que o MDT (1 m de resolução

espacial) e as ortoimagens CBERS 04A-WPM fusionadas (2 m de resolução espacial) satisfazem a precisão gráfica para representação em escala 1:10.000⁵ (mapas físicos), conforme Eq. (11) (IBGE, 1999), bem como atendem aos requisitos de representação para mapas digitais nessa escala (BRASIL, 2016b).

$$e_m = 0,0002 * D , \quad (11)$$

em que e_m é o erro tolerável em metros e D é o denominador da escala.

Neste estudo, para a elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas, foram adquiridos os insumos detalhados na Subseção 3.2.1. Em ambiente SIG, foram aplicadas as operações descritas na Subseção 3.2.4 nesses insumos, o que possibilitou a obtenção de 10 camadas de informação. Essas camadas, junto com os dados de tipo de rodado, umidade relativa do ar e velocidade média do vento, serviram de entrada para a MCDA operacionalizada pelo AHP.

Para a avaliação da trafegabilidade em cada célula, foi proposto um método híbrido, com utilização de uma abordagem inicialmente categórica e, nas células remanescentes, quantitativa. Em primeiro lugar, determinadas células, dada a presença de classes que por si só impedem ou tornam adequada a trafegabilidade de viaturas, foram, respectivamente, definidas categoricamente como impeditivas – como a classe de vegetação densa da camada de informação de uso e cobertura da terra – ou adequadas – como no caso de presença de malha viária na célula analisada.

Secundariamente, nas células não classificadas categoricamente, foi empregada uma abordagem quantitativa com utilização da MCDA pelo AHP. Como resultado, obteve-se o mapa de trafegabilidade de viaturas. Com o emprego desse mapa, transformado em um mapa de custo, e do algoritmo de Dijkstra, foram automatizadas rotas – preferencial, razoável e desafiadora – entre dois pontos (origem e destino).

A plataforma de modelagem utilizada foi o *Dinamica* EGO, que permitiu o desenvolvimento de dois modelos – um para a elaboração de mapas de

⁵ Não obstante, ressalta-se que não foi verificado o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) das imagens CBERS 04A-WPM fusionadas para a área de estudo. Nesse caso, em virtude do relevo acidentado da região, uma classificação PEC para escalas menores que 1:10.000 poderia ser ajustada por meio de georreferenciamento, visando-se à correção da exatidão planimétrica dessas imagens, o que fugiu ao escopo deste estudo.

trafegabilidade de viaturas e outro para a automação de rotas –, em particular por meio de seu construtor modular e respectivos *functors*⁶.

A camada de informação de uso e cobertura da terra, o mapa de trafegabilidade de viaturas e as rotas automatizadas foram validados por meio de levantamento de campo e dados auxiliares – ortofotos SC 2010-2012, imagens do Google *Earth* PRO e pontos de validação do MapBiomas (MAPBIOMAS, 2023).

No levantamento de campo, foram coletadas diretamente no terreno amostras de uso e cobertura da terra e de classes de restrições à trafegabilidade. Para tanto, foram utilizados *tablet* e *smartphones*, por meio de Posicionamento por Ponto Único (*Single Point Positioning* – SPP). Visando lidar com a imprecisão posicional desses aparelhos no SPP, os pontos amostrais foram coletados observando-se a precisão indicada pelo aparelho receptor no momento da coleta e evitando-se regiões de fronteira entre diferentes classes (áreas de incertezas).

Por seu turno, a coleta de pontos de declividade foi realizada com emprego dos clinômetros. Foram realizados, ainda, registros fotográficos do terreno – com emprego de *smartphones*, *tablet* e drone –, em especial dos elementos de importância para a avaliação da trafegabilidade, como obstáculos que pudessem dificultar deslocamentos fora da estrada.

As validações da classificação da camada de informação de uso e cobertura da terra e do mapa de trafegabilidade de viaturas foram realizadas por meio de seis índices de qualidade para avaliação de produtos cartográficos, todos derivados da matriz de confusão: precisão, *recall*, F1-Score, exatidão global, índice Kappa e Kappa condicional por classes (CONGALTON; GREEN, 2009).

Para a obtenção das matrizes de confusão da camada de informação de uso e cobertura da terra e do mapa de trafegabilidade de viaturas, utilizou-se amostragem aleatória estratificada uniforme, com coleta de 30 amostras de cada classe da verdade de campo, que posteriormente foram comparadas com as classes preditas para essas amostras. A escolha por esse tipo de amostragem visou: assegurar que todas as classes tivessem a mesma influência na análise da exatidão global, evitando que classes majoritárias dominassem as estatísticas de avaliação; obter uma melhor estimativa de acurácia das classes minoritárias que de outra forma poderia ser

⁶ No Dinamica EGO, um *functor* é um bloco funcional que executa operações específicas dentro do modelo, manipulando e processando dados espaciais em um fluxo estruturado de informações.

distorcida por um baixo número de amostras; permitir uma interpretação mais direta e comparável entre classes na matriz de confusão; e reduzir o viés de classes majoritárias ao não se negligenciar as classes minoritárias (RATKE, 2018).

A validação de 17 rotas automatizadas para fins de teste do modelo de automação de rotas foi realizada por meio do cálculo da precisão, em que foi possível quantificar a viabilidade e coerência dessas rotas com a trafegabilidade no terreno. Para tanto, considerou-se a distância aceitável percorrida na rota dividida por sua extensão total (Eq. (12)) (CHICCO; JURMAN, 2020).

$$\text{Precisão} = \frac{VP}{VP + FP} , \quad (12)$$

em que *VP* (Verdadeiro Positivo) é a distância percorrida aceitável da rota e *FP* (Falso Positivo) é a distância percorrida não válida, ou seja, inconsistente com a verdade de campo.

No levantamento de campo, também foram realizados rastreamentos (*trackings*) com uso do aplicativo GPS *Logger* instalado em um *tablet*, com rastreio de pontos a cada dois segundos. Posteriormente, esses rastreios foram comparados com duas rotas geradas pelo modelo de automação de rotas, calculando-se a Raiz do Erro Quadrático Médio (*Root Mean Square Error* – RMSE) por meio das Eq. (13) e Eq. (14) (BRASIL, 2016a).

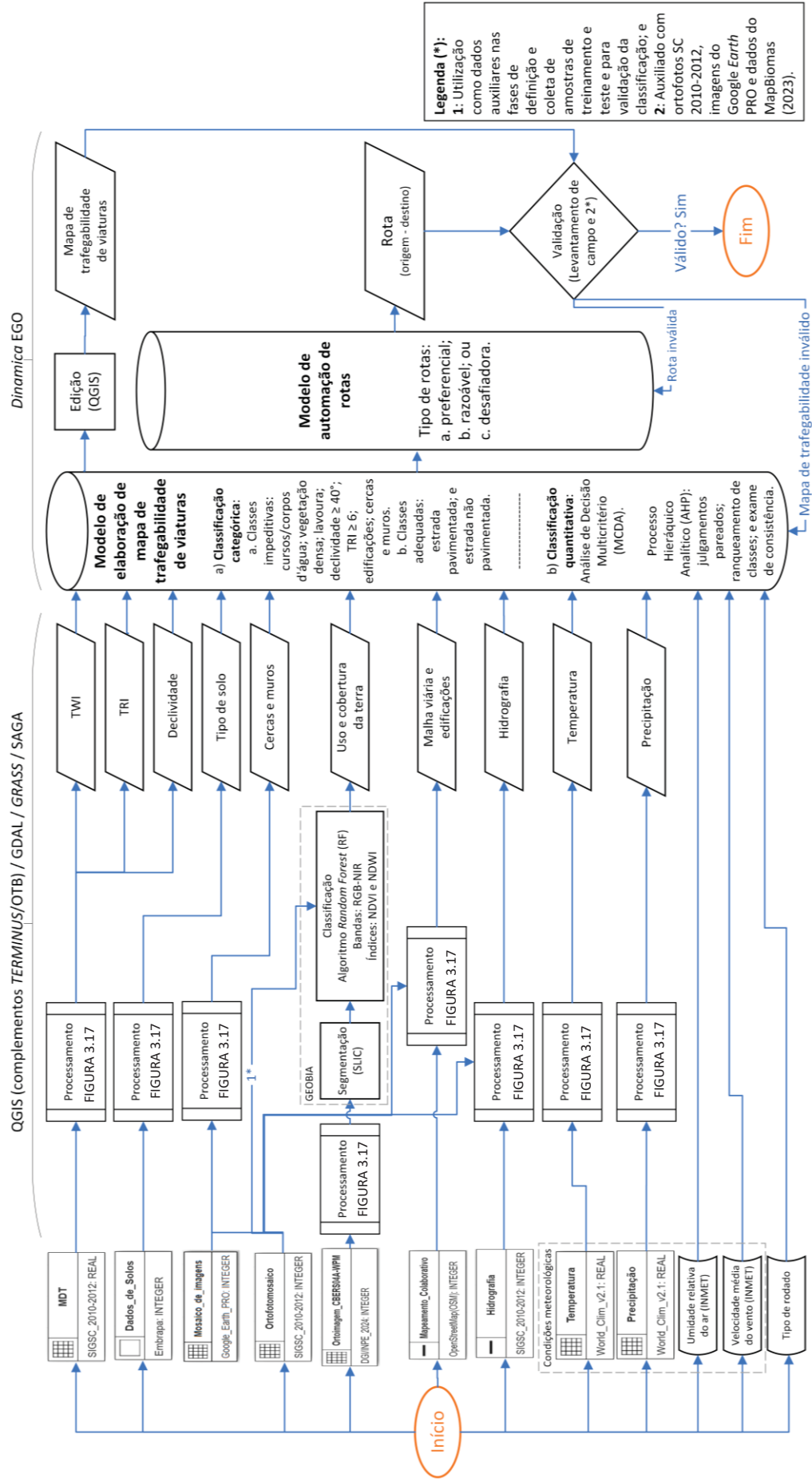
$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}} , \quad (13)$$

$$d_i = \sqrt{(E_{\text{campo}} - E_{\text{modelo}})^2 + (N_{\text{campo}} - N_{\text{modelo}})^2} , \quad (14)$$

em que *n* é a quantidade de pontos amostrais sobre as rotas comparadas, *d_i* é o erro posicional planimétrico e (E, N) são as coordenadas UTM dos pontos de validação coletados sobre as rotas rastreadas em campo (*E_{campo}*, *N_{campo}*) e automatizadas pelo modelo (*E_{modelo}*, *N_{modelo}*).

Os procedimentos descritos nesta subseção podem ser visualizados na FIGURA 3.16, que traz o fluxograma geral do método para elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas e automação de rotas.

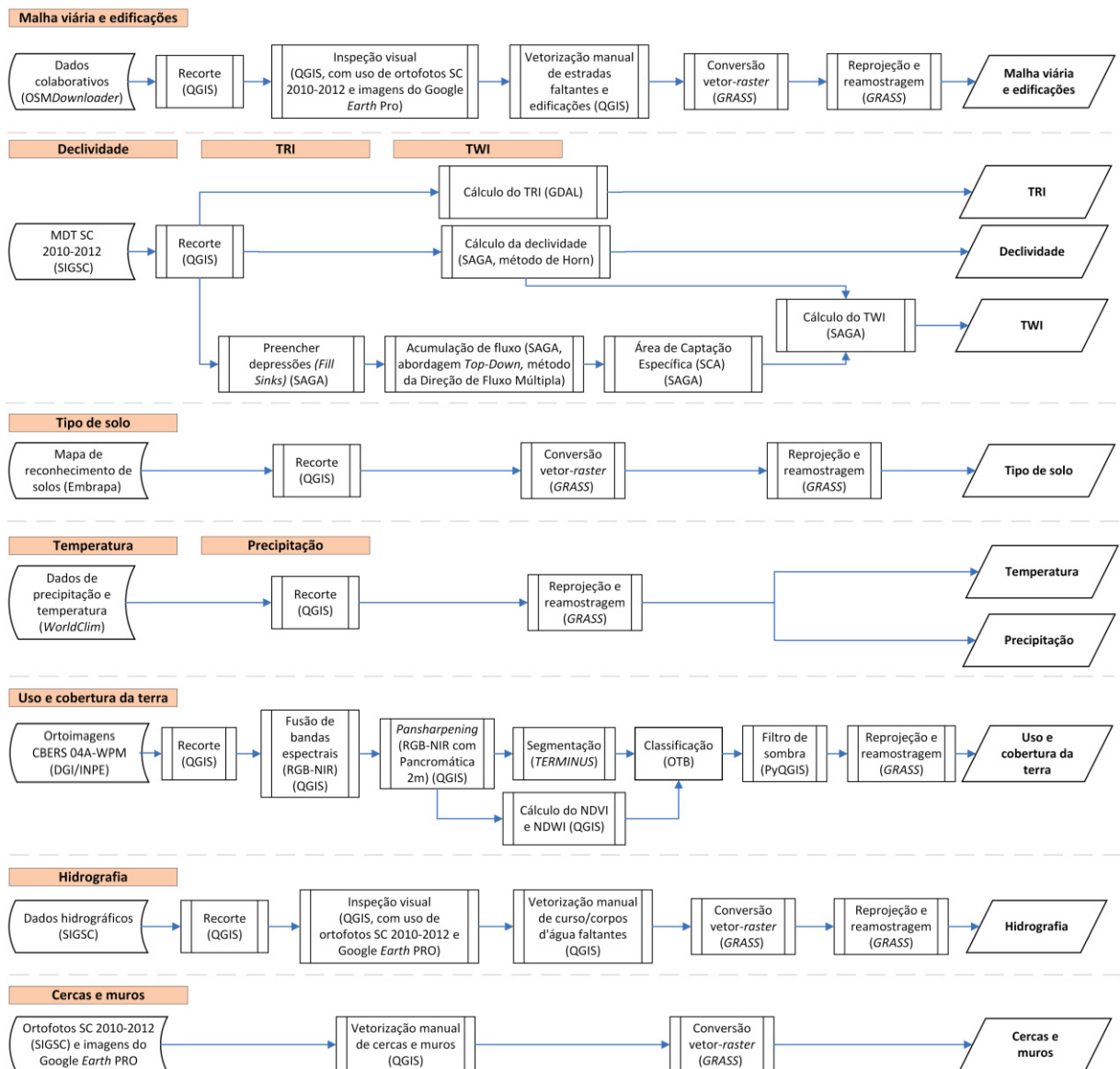
FIGURA 3.16 – FLUXOGRAMA GERAL DO MÉTODO ADOTADO PARA A ELABORAÇÃO DE MAPAS DE TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS E AUTOMAÇÃO DE ROTAS ENTRE DOIS PONTOS (ORIGEM E DESTINO).



3.2.4 Processamento de camadas de informação

Para a obtenção das camadas de informação que serviram de entrada na MCDA, foram realizados processamentos dos insumos obtidos em repositórios digitais por meio do QGIS e dos complementos *OSMDownloader*, *Terminus*, OTB, GDAL, *GRASS* e *SAGA*. A FIGURA 3.17 apresenta os principais processos e operações aplicados a esses insumos. O primeiro elemento dos fluxos representa o insumo utilizado na elaboração das respectivas camadas de informação, sendo submetido às operações na sequência indicada.

FIGURA 3.17 – VISÃO GERAL DO FLUXO DE PRÉ-PROCESSAMENTO, SEGMENTAÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E DEMAIS PROCESSAMENTOS PARA A OBTENÇÃO DAS CAMADAS DE INFORMAÇÃO DE ENTRADA (*INPUTS*) DA MCDA.



Os procedimentos para a obtenção das camadas de informação de uso e cobertura da terra, declividade, TWI e TRI foram detalhados, respectivamente, nas Subseções 3.2.4.2, 3.2.4.1.1, 3.2.4.1.2 e 3.2.4.1.3. A camada de uso e cobertura da terra, composta por diferentes classes de interesse para a trafegabilidade, demandou o maior volume de trabalho, uma vez que foram necessárias a segmentação e classificação das imagens CBERS 04A-WPM, em conjunto com a abordagem GEOBIA. Para tanto, foram utilizados os complementos *Terminus* e OTB do QGIS.

As demais camadas foram processadas com emprego de operações comuns em ambiente SIG, como recorte, vetorização, conversão vetor-*raster*, reprojeção e reamostragem. Esses pré-processamentos (FIGURA 3.17) foram detalhados no QUADRO 3.3.

QUADRO 3.3 – DETALHAMENTO DE PRÉ-PROCESSAMENTOS DOS INSUMOS.

Operação	Função
Recorte	Extração dos insumos delimitada pela área de estudo.
Inspeção visual	Identificar erros, discrepâncias ou dados ausentes; comparação e fotointerpretação por meio de imagens de referência.
Vetorização manual	Desenho de feições vetoriais (pontos, linhas e polígonos) diretamente sobre as imagens de referência para obtenção de dados ausentes ou incompletos.
Conversão vetor- <i>raster</i>	Processo de transformação de feições vetoriais (pontos, linhas ou polígonos) em uma representação <i>raster</i> , onde cada célula do <i>raster</i> recebeu um valor baseado nos atributos das feições vetoriais.
Reprojeção	Transformação dos dados para um sistema de coordenadas único (SIRGAS 2000, UTM Zona 22S, EPSG 31982), uma vez que se fez necessário que todas as camadas estivessem no mesmo sistema para a realização de análises espaciais.
Reamostragem	Alteração da resolução espacial das camadas <i>rasters</i> , para que todas tivessem a mesma resolução espacial, tendo em vista possibilitar comparações, análises e processamentos posteriores na MCDA.

Ressalta-se que todas as camadas de informação foram reprojatadas para o mesmo Sistema de Referência de Coordenadas (SRC) – SIRGAS2000, com projeção UTM Zona 22S (EPSG: 31982) – e reamostradas para uma célula de tamanho 1x1 m. Visou-se, assim, permitir a aplicação da MCDA com o AHP em cada célula homóloga dessas camadas, para a elaboração do mapa de trafegabilidade de viaturas da área de estudo.

3.2.4.1 Relevô

Por conta da importância do relevo na trafegabilidade, foi utilizado o MDT SC 2010-2012 de alta resolução espacial (1 m), obtido de levantamento aerofotogramétrico, do qual foram derivadas as camadas de informação relativas ao relevo local – declividade, TWI e TRI.

3.2.4.1.1 Declividade

O filtro convolucional 3x3 de Horn (1981), disponível no GDAL/QGIS, foi utilizado para percorrer todas as células do MDT SC 2010-2012 na área de estudo. A declividade (em graus) foi calculada em cada uma dessas células por meio da Eq. (15), operacionalizada pela Eq. (16), que faz uso das altitudes das oito células vizinhas à célula central objeto do cálculo (CHANG, 2018).

$$\text{Declividade} = \arctan \left(\sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2} \right), \quad (15)$$

em que dz/dx e dz/dy são as variações no valor z (elevação) em relação a variações infinitesimais, respectivamente, nas direções x e y da imagem.

$$\text{Declividade} = \arctan \left(\frac{\sqrt{((Viz_1 + 2*Viz_4 + Viz_6) - (Viz_3 + 2*Viz_5 + Viz_8))^2 + ((Viz_6 + 2*Viz_7 + Viz_8) - (Viz_1 + 2*Viz_2 + Viz_3))^2}}{8* \text{Tamanho}_{\text{célula}}} \right) \frac{180}{\pi}, \quad (16)$$

em que $Viz_1 \dots 8$ são as altitudes das vizinhanças da célula central.

Para a classificação da declividade quanto à trafegabilidade, foram utilizadas as faixas de valores dispostas na TABELA 3.3. Na área de estudo, para a camada de informação de declividade, foram obtidas medidas de 0° (plano) a 90° (inclinação máxima), mostrando-se tratar de uma região com alta heterogeneidade na paisagem, englobando áreas de planícies até regiões altamente escarpadas.

TABELA 3.3 – CAMADA DE INFORMAÇÃO DE DECLIVIDADE, RESPECTIVAS CLASSES E TIPOS DE SUPERFÍCIES DO TERRENO ASSOCIADAS.

Camada de informação	Declividade (graus)	Superfície	Classe de restrições à trafegabilidade
Declividade	< 7	Plana	Adequada
	7 – 14	Quase plana	Muito pouco restritiva
	14 – 21	Pouco inclinada	Pouco restritiva
	21 – 28	Razoavelmente inclinada	Restritiva
	28 – 35	Inclinada	Muito restritiva
	35 – 40	Altamente inclinada	Extremamente restritiva
	≥ 40	Extremamente inclinada	Impeditiva

FONTE: Adaptado de Brasil (2011), He *et al.* (2023) e Pundir e Garg (2020a).

3.2.4.1.2 Índice Topográfico de Umidade (TWI)

O fluxo de processos empregado para a obtenção do TWI foi operacionalizado por meio do SAGA, de acordo com o método adotado em Mattivi *et al.* (2019) e disposto na FIGURA 3.17. Inicialmente, foi aplicado no MDT SC 2010-2012 o algoritmo de identificação e resolução de artefatos (depressões espúrias) (*fill sinks*) (WANG; LIU, 2006), visando permitir a continuidade do fluxo de água sobre a superfície do terreno sem que essas depressões retenham água de forma irrealista.

Após, o MDT corrigido foi utilizado no algoritmo de acumulação de fluxo para determinar a acumulação de fluxo, ou seja, a área total que contribui para o escoamento de água em cada célula. O processamento foi realizado das células de maior altitude para as células de menor altitude (abordagem *Top-Down*), com emprego do método da Direção de Fluxo Múltipla (QUINN *et al.*, 1991).

A partir da acumulação de fluxo e da largura do fluxo, foi calculada a SCA (Eq. (9)). Por seu turno, a declividade do terreno foi calculada por meio do método do plano ajustado por mínimos quadrados (método de Horn) (COSTA-CABRAL; BURGESS, 1994; HORN, 1981). Por fim, por meio da SCA e da declividade, foi obtida a camada de informação de TWI (Eq. (8)).

Para a classificação do TWI em classes de restrições à trafegabilidade de viaturas, foram utilizadas as faixas de valores dispostas na TABELA 3.4. O TWI na área de estudo variou entre -4 e 25, o que demonstra tratar-se de uma região de alta variação quanto à probabilidade de acumulação de água. Espera-se, assim, encontrar áreas menos úmidas (normalmente nos picos de morros) e de alta umidade (vales profundos).

TABELA 3.4 – CAMADA DE INFORMAÇÃO DE TWI, RESPECTIVAS CLASSES E TIPOS DE SUPERFÍCIES DO TERRENO ASSOCIADAS.

Camada de informação	Faixa de valores	Superfície do terreno	Classe de restrições à trafegabilidade
TWI	< 8	Seca	Adequada
	8 – 12	Pouco úmida	Pouco restritiva
	12 – 16	Úmida	Restritiva
	≥ 16	Saturada	Muito restritiva

FONTE: Adaptado de Khan, Kashif e Shah (2021).

3.2.4.1.3 Índice Topográfico de Rugosidade (TRI)

O cálculo do TRI foi operacionalizado por meio de algoritmo presente no GDAL/QGIS. A TABELA 3.5 traz a associação de faixa de valores do TRI com as características de rugosidade do terreno e respectivas restrições à trafegabilidade. Na área de estudo, o TRI variou de 0 a 96, apresentando assim uma variação que passa por áreas niveladas do terreno (adequadas), até áreas extremamente rugosas, impeditivas à trafegabilidade de viaturas.

TABELA 3.5 – CAMADA DE INFORMAÇÃO DE TRI, RESPECTIVAS CLASSES E TIPOS DE SUPERFÍCIES DO TERRENO ASSOCIADAS.

Camada de informação	Faixa de valores	Superfície do terreno	Classe de restrições à trafegabilidade
TRI	< 1	Nivelada	Adequada
	1 – 2	Quase nivelada	Muito pouco restritiva
	2 – 3	Levemente rugosa	Pouco restritiva
	3 – 4	Intermediária rugosa	Restritiva
	4 – 5	Moderadamente rugosa	Muito restritiva
	5 – 6	Altamente rugosa	Extremamente restritiva
	≥ 6	Extremamente rugosa	Impeditiva

FONTE: Adaptado de Potic *et al.* (2024) e Riley, Degloria e Elliot (1999).

3.2.4.2 Uso e cobertura da terra

Para a obtenção da camada de informação de uso e cobertura da terra, foram utilizadas imagens CBERS 04A-WPM, que possuem limitações quanto à disponibilidade de bandas espectrais – apenas quatro disponíveis, RGB-NIR. Isso faz com o que as diferenças nos atributos espectrais das classes se tornem menores, enfraquecendo a separabilidade estatística no domínio espectral da imagem. Assim, há a necessidade de utilização de outras características dos objetos da cena para

permitir um maior desempenho por parte dos algoritmos classificadores. Para tanto, foi adotada a GEOBIA na extração das classes de uso e cobertura da terra de interesse para a trafegabilidade.

3.2.4.2.1 Segmentação

Para a extração de classes de interesse para a trafegabilidade, foi realizada a segmentação das imagens CBERS 04A-WPM em objetos geográficos, internamente homogêneos, mas heterogêneos entre si. Para tanto, foi empregado o algoritmo de Agrupamento Iterativo Linear Simples (*Simple Linear Iterative Clustering* – SLIC) (ACHANTA *et al.*, 2012), presente no complemento *Terminus*/QGIS, utilizando-se como parâmetros o número de segmentos igual a 900.000, compacidade 0,05 e sigma – largura do *kernel* de suavização gaussiana – igual a 1. Essa configuração final de parâmetros do algoritmo SLIC foi obtida por testes manuais (empíricos) e gerou um total de 476.006 segmentos em toda a área de estudo.

3.2.4.2.2 Extração de atributos

Os atributos (QUADRO 3.4) dos objetos foram calculados para cada uma das bandas disponíveis (RGB-NIR) nas imagens CBERS 04A-WPM. Também, foram calculados os atributos de dois índices gerados por aritmética de bandas espectrais: o NDVI, conforme Eq. (17) (ROUSE *et al.*, 1974); e o NDWI, conforme Eq. (18) (GAO, 1996), totalizando 72 diferentes atributos para cada um dos objetos segmentados.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}, \quad (17)$$

em que *R* são os valores de reflectância dos *pixels* da banda do vermelho e *NIR* os valores de reflectância dos *pixels* da banda do infravermelho próximo. Na área de estudo, o NDVI variou de -0,27 a 0,82.

$$NDWI = \frac{G - NIR}{G + NIR}, \quad (18)$$

em que *G* são os valores de reflectância dos *pixels* da banda do verde. Na área de estudo, o NDWI variou de -0,93 a 0,36.

QUADRO 3.4 – ATRIBUTOS CALCULADOS PARA AS BANDAS ESPECTRAIS DISPONÍVEIS NAS IMAGENS CBERS 04A-WPM E PARA OS ÍNDICES NDVI E NDWI.

Atributo	Detalhamento
Contagem	Conta o número de <i>pixels</i> .
Soma	Soma os valores dos <i>pixels</i> .
Média	Medida de tendência central para os valores dos <i>pixels</i> .
Mediana	
Mínimo	Obtém o mínimo nos valores dos <i>pixels</i> .
Máximo	Obtém o máximo nos valores dos <i>pixels</i> .
Intervalo	Obtém o intervalo (máximo - mínimo) de valores de <i>pixels</i> .
Minoria	Obtém o valor do <i>pixel</i> menos representado.
Maioria	Obtém o valor do <i>pixel</i> mais representado.
Variabilidade	Contador de número de valores de <i>pixels</i> distintos.
Desvio-padrão	Medida de dispersão entre os valores dos <i>pixels</i> .
Variância	

FONTE: Adaptado de QGIS (2023).

3.2.4.2.3 Definição de classes de interesse para a trafegabilidade

Por meio de inspeção visual da cena, foi detectado um total de seis classes de interesse para a trafegabilidade passíveis de extração: vegetação densa, parque, vegetação rasteira, lavoura, solo exposto e curso/corpos d'água (QUADRO 3.5).

No mapeamento, levou-se em consideração o proposto por Sadiya, James e Oladiti (2017) para as classes vegetação densa, lavoura e curso/corpos d'água, que foram consideradas obstáculos intransponíveis para as viaturas. A classe parque apresenta restrições pela presença de vegetação que dificulta a trafegabilidade. A vegetação rasteira e solo exposto normalmente não apresentam restrições significantes à trafegabilidade, sendo assim regiões adequadas.

A classe sombra, extraída junto com as classes de interesse para a trafegabilidade, por apresentar uma incerteza gerada pela geometria de tomada da imagem, foi reclassificada em alguma dessas classes por meio de código desenvolvido em linguagem *Python* para o QGIS (PyQGIS) (APÊNDICE 1).

QUADRO 3.5 – DESCRITIVO DE CLASSES DE USO E COBERTURA DA TERRA DE INTERESSE PARA A TRAFEGABILIDADE.

Classe de uso e cobertura da terra ²	Descrição	Classe de restrições à tráfegabilidade
Vegetação densa (FIGURA 3.19)	Áreas de vegetação fechada, com sub-bosque; alta densidade de espécies vegetais de médio e grande porte; silvicultura; vegetação arbórea e arbustiva sem possibilidade de tráfego entre os indivíduos.	Impeditiva ¹
Parque (FIGURA 3.20)	Área ocupada por espécies vegetais espaçadas entre si de modo a possibilitar a passagem de viaturas de pequeno e médio porte; normalmente originadas de intervenção humana, desbaste ou raleio; capinas que impedem o crescimento de sub-bosque.	Restritiva
Vegetação rasteira (FIGURA 3.21)	Áreas com espécies de gramíneas; campos limpo; pastos.	Adequada
Lavoura (FIGURA 3.22)	Cultivos agrícolas diversos para consumo humano ou animal; culturas anuais, semiperenes ou perenes.	Impeditiva ¹
Solo exposto (FIGURA 3.23)	Áreas sem vegetação superficial, devido a processos naturais ou artificiais; vias não pavimentadas; rochas afloradas de poucos centímetros ao nível do solo; aceiro.	Adequada
Curso/corpos d'água (FIGURA 3.24)	Regiões caracterizadas por acúmulo de água na superfície; rios; lagos; lagoas, naturais ou artificiais.	Impeditiva ¹

Nota¹: Conforme restrições apresentadas por Sadiya, James e Oladiti (2017);

Nota²: As cercas, muros, malha viária e edificações (FIGURA 3.18), ainda que façam parte do uso e cobertura da terra, foram adquiridos por processos diversos apresentados na FIGURA 3.17.

FIGURA 3.18 – VIA PAVIMENTADA (A) E NÃO PAVIMENTADA (B), CERCA (C) E EDIFICAÇÃO (D).

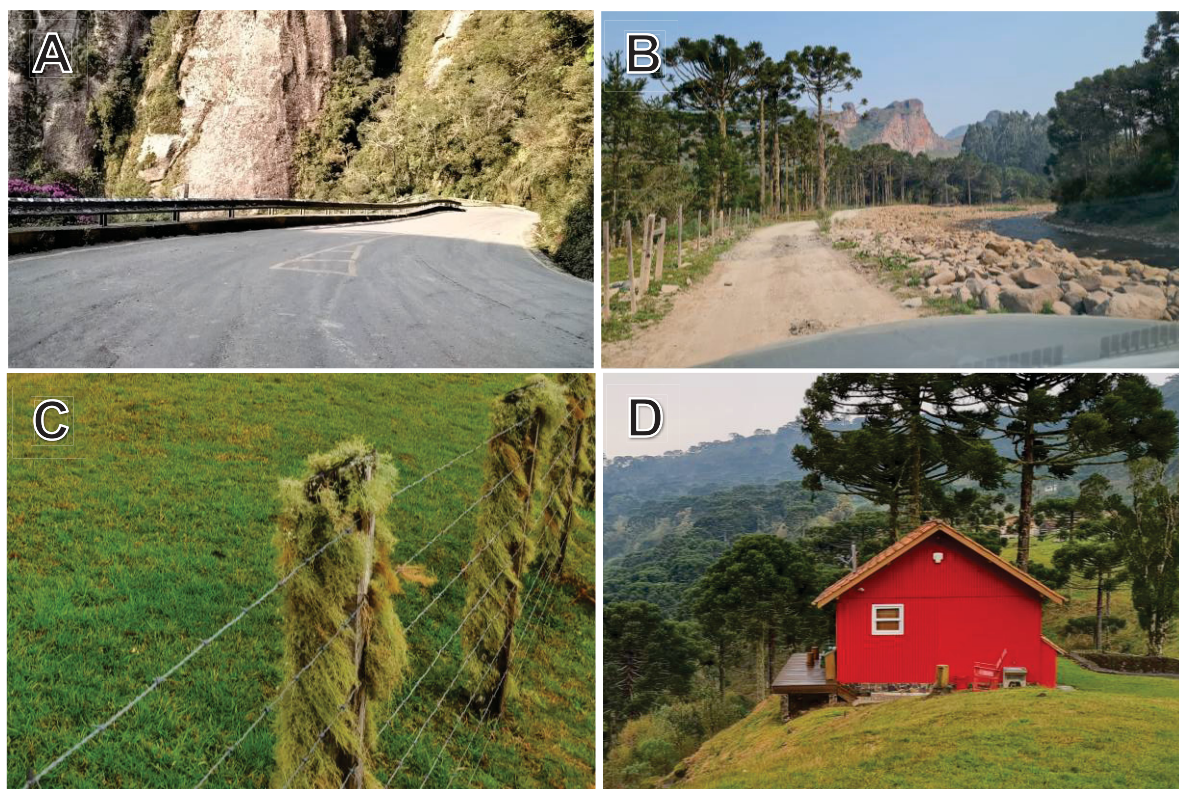


FIGURA 3.19 – VEGETAÇÃO DENSE NA ENCOSTA DE MORROS (A) E EM VALE (B).



FIGURA 3.20 – PARQUE.



FIGURA 3.21 – VEGETAÇÃO RASTEIRA NATURAL (A) E MANEJADA (B).



FIGURA 3.22 – LAVOURA: CULTIVO DE HORTALIÇAS (A), POMAR (B) E EM FASE DE DESENVOLVIMENTO VEGETATIVO (C).



FIGURA 3.23 – SOLO EXPOSTO DA ORDEM DOS ARGISSOLOS (A) E DOS CAMBISSOLOS (B).

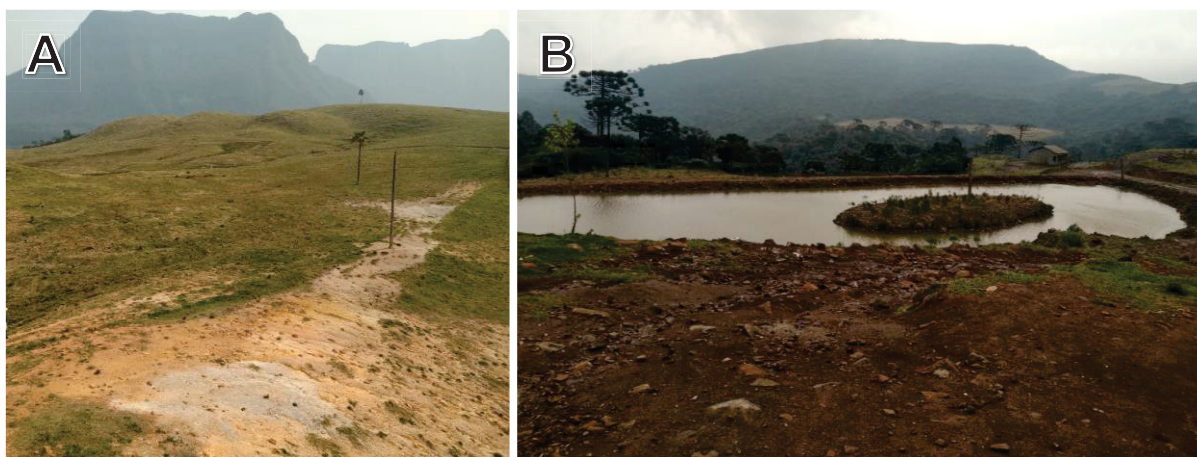
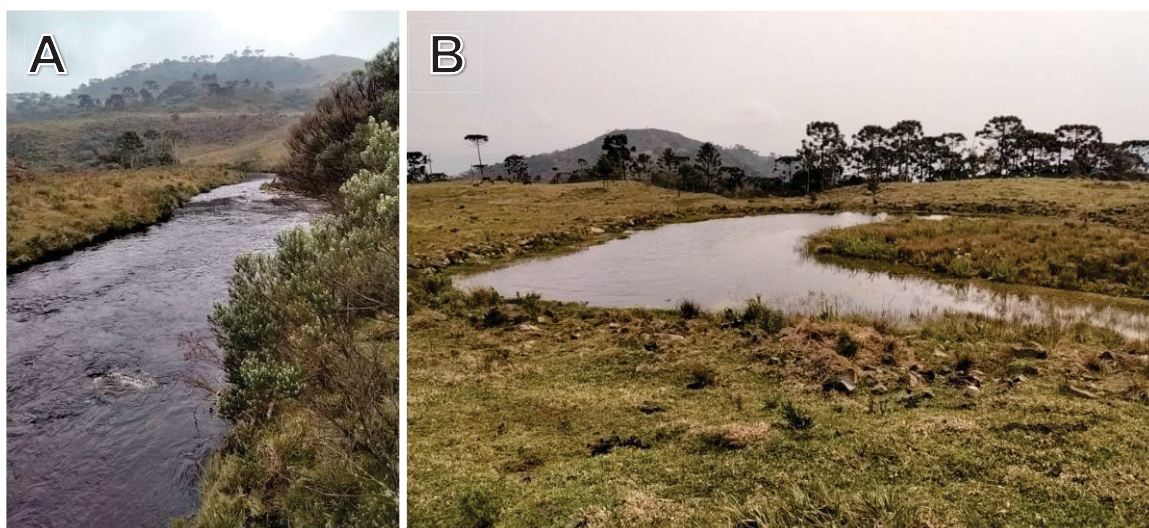


FIGURA 3.24 – CURSO D'ÁGUA (A) E CORPO D'ÁGUA (B).



3.2.4.2.4 Classificação

Para a classificação, amostras de cada uma das classes de interesse para a trafegabilidade (QUADRO 3.5) foram coletadas manualmente, e posteriormente divididas em 70% para treinamento (283 conjuntos amostrais) e 30% para teste do algoritmo classificador (121 conjuntos amostrais). Para tanto, foram utilizadas as ortofotos SC 2010-2012 e as imagens do Google *Earth* Pro como meios auxiliares na identificação e designação dos objetos nas respectivas classes amostrais.

O algoritmo de Aprendizado de Máquina utilizado para a classificação supervisionada foi o RF (BREIMAN, 2001), com os parâmetros obtidos por testes manuais (empíricos) baseados na acurácia alcançada com o emprego dos conjuntos amostrais de teste: profundidade máxima das árvores igual a 50, número mínimo de amostras em cada nó igual a três e número máximo de árvores igual a 200. Verificou-se que valores menores para esses parâmetros provocaram degradação da qualidade da classificação, e valores maiores não tiveram efeitos positivos observáveis, apenas diminuição do desempenho com maior tempo de processamento.

3.2.4.3 Tipo de solo

Os solos presentes na área de estudo foram identificados no QUADRO 3.6, que permite observar ainda as suas características principais e respectivos efeitos sobre a trafegabilidade. Esses efeitos são resultantes da aplicação de força (peso) das viaturas sobre o solo, comprimindo-o. Assim, as partículas do solo sofrem rearranjo e compactação, interferindo na força de tração (atrito entre o rodado e o solo) e na força de cisalhamento sobre o solo (CHEN *et al.*, 2024).

Verifica-se que a área de estudo é formada principalmente por solos de textura argilosa (Cambissolo e Argissolo), o que a torna um desafio para a trafegabilidade, em especial quando há uma saturação desses solos por fontes de água, como curso/corpos d'água próximos e, principalmente, precipitação. Para a modelagem do tipo de solo na MCDA, consideraram-se as características do solo quanto à textura – com presença ou não de argila ou cascalho –, permeabilidade, profundidade total e a presença de rochas afloradas como os principais fatores influenciadores na trafegabilidade.

QUADRO 3.6 – SOLOS DA ÁREA DE ESTUDO E IMPLICAÇÕES NA TRAFEGABILIDADE.

SiBCS	Textura ³	Permeabilidade ²	Profundidade ⁴	Afloramento rochoso? ³	Classe de restrições à tráfegabilidade
Cambissolo húmico aluminico	Muito argilosa	Baixa	Profundo	Sim	Muito restritiva ⁵
	Argilosa		Pouco Profundo		Restritiva ⁵
Argissolo vermelho-amarelo distrófico latossólico	Médio argilosa em profundidade ¹	Média	Médio profundo		Pouco restritiva
Neossolo litólico chernossólico	Cascalhenta	Alta	Raso		Adequada

Nota¹: Os Argissolos vermelho-amarelos são caracterizados pelo acúmulo de argila em profundidade em virtude da transferência de argila de sua camada superficial (LEITE, 2022);

Nota²: O excesso de umidade e de água acumulada no solo é uma forte restrição à tráfegabilidade de viaturas, especialmente quando o solo está excessivamente úmido (BASU *et al.*, 2024). A permeabilidade auxilia na drenagem, aumentando a capacidade de suporte do solo ao peso das viaturas (FJELD *et al.*, 2024);

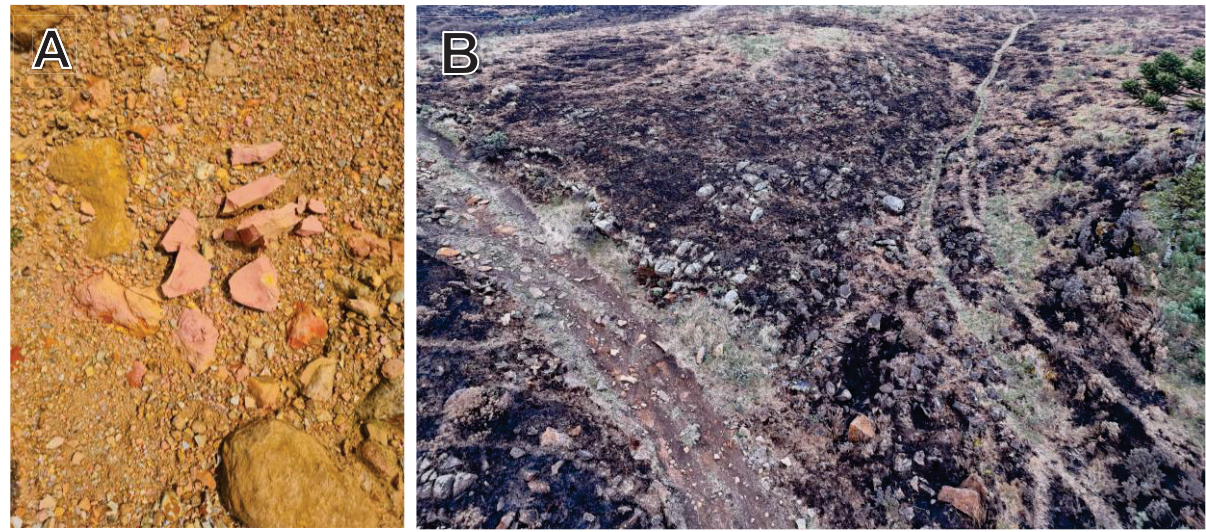
Nota³: A textura e o afloramento rochoso para os solos analisados foram obtidos de Embrapa (2018);

Nota⁴: A profundidade do solo foi obtida da conjugação dos conhecimentos e análises disponibilizados em Epagri (2022), Muller (2020) e Potter *et al.* (2004); e

Nota⁵: Adaptado dos coeficientes de tráfegabilidade para os tipos de solo estabelecidos por Potic *et al.* (2024).

A textura argilosa (FIGURA 3.25A), afloramento rochoso (FIGURA 3.25B) e profundidade são ditos inversamente proporcionais à tráfegabilidade, uma vez que prejudicam os deslocamentos fora de estrada (RAUF *et al.*, 2024).

FIGURA 3.25 – SOLO COM TEXTURA ARGILOSA (A) E COM ROCHAS AFLORADAS (B).



Por outro lado, a textura cascalhenta e a permeabilidade auxiliam a tráfegabilidade, uma vez que o cascalho aumenta a aderência do pneu com a

superfície de rodagem, e os solos mais permeáveis – com maior drenagem superficial – facilitam o escoamento de água, aumentando o suporte do solo ao peso das viaturas. Essas características dificultam o atolamento ou perda de aderência entre o sistema formado pelo rodado e pela superfície do terreno (RAUF *et al.*, 2024).

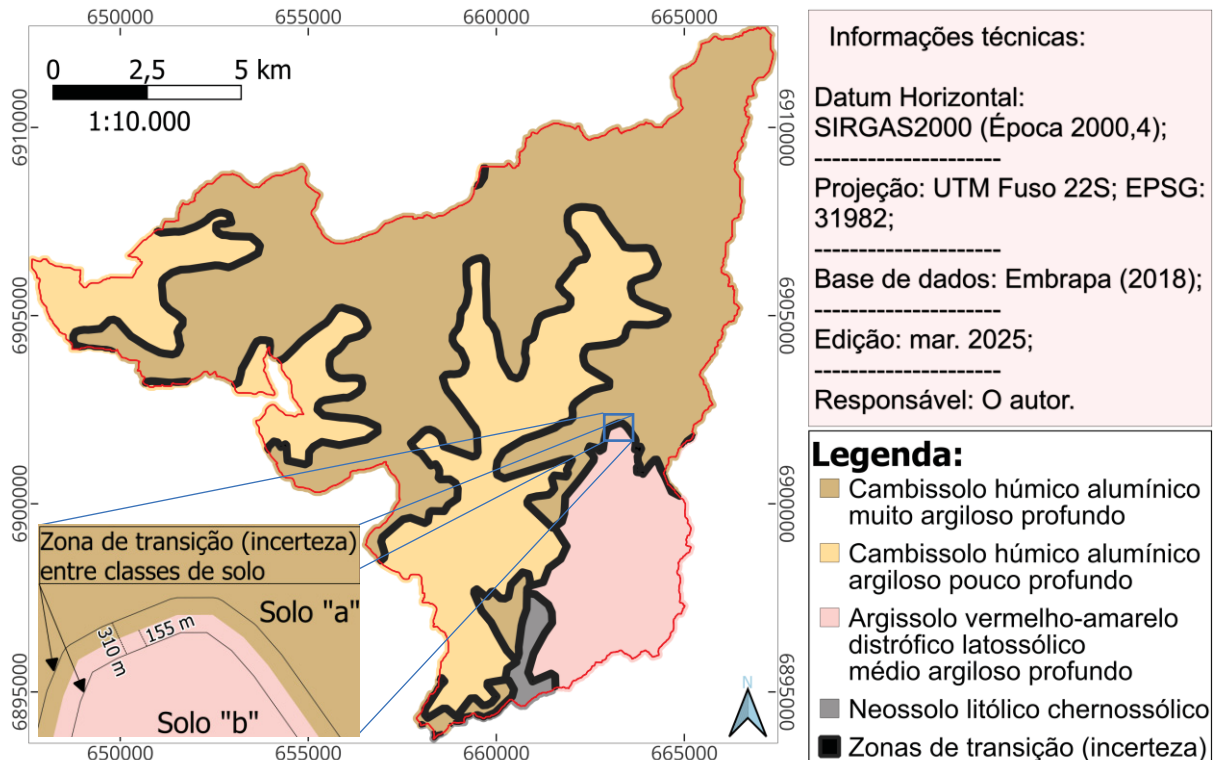
3.2.4.3.1 Tratamento de incertezas do tipo de solo

Conforme Silva (2020), as incertezas de um modelo podem ser internas ou externas. As incertezas internas estão associadas aos julgamentos subjetivos, à competência do(s) especialista(s), à modelagem e aos insumos empregados, enquanto as incertezas externas referem-se a fatores ambientais que escapam ao controle do(s) especialista(s), sendo, portanto, de difícil mensuração e modelagem. Neste estudo, não foram tratadas as incertezas externas. Por outro lado, a incerteza interna relativa à camada de informação do tipo de solo foi tratada por meio da Lógica Fuzzy (ZADEH, 1965).

Para tanto, calculou-se em 50 m o erro tolerável (e_m) (Eq. (11)) relativo ao mapa de reconhecimento de solos (escala 1:250.000) utilizado na elaboração da camada de informação do tipo de solo. Por outro lado, verificou-se que o Erro Médio (EM) e o Erro Padrão (EP) para o PEC classe “A” nessa escala é igual a, respectivamente, 70 m e 42,5 m (BRASIL, 2016a). Adotando-se um intervalo de confiança de 95% (cerca de dois EPs) (DEVORE, 2018), chega-se a uma incerteza na exatidão posicional de aproximadamente 155 m para o mapa de reconhecimento de solos, maior que o e_m (50 m) calculado.

Por conseguinte, foram criadas zonas de transição (incerteza) de 310 m, ou seja, um *buffer* de 155 m de largura para cada lado da fronteira (áreas limítrofes) entre classes de solos adjacentes. Essas zonas de transição podem ser observadas na FIGURA 3.26.

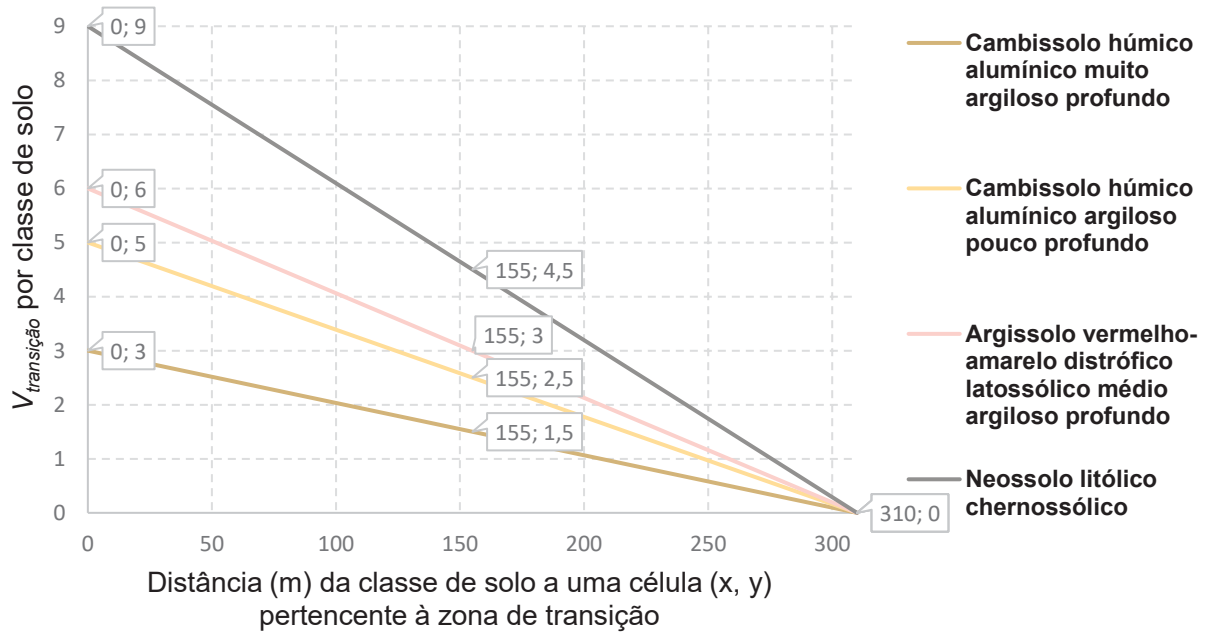
FIGURA 3.26 – CLASSES DE TIPO DE SOLO COM RESPECTIVAS ZONAS DE TRANSIÇÃO.



O tratamento da incerteza inerente às zonas de transição foi realizado com emprego de funções lineares decrescentes (FIGURA 3.27) referentes às classes de solo. Assim, o valor referente à distância zero (intercepto y) das classes de solo refere-se ao posto dado aos solos pela TABELA 3.9. Ao aumentar a distância de um determinado tipo de solo a uma célula da zona de transição, a influência desse solo nessa célula diminui, com o valor de transição ($V_{transição}$) referente a esse solo indo a zero na distância de 310 m.

Como uma célula da zona de transição está sob influência de dois diferentes tipos de solo adjacentes, soma-se o $V_{transição}$ desses solos para se obter o $V_{transição_final}$. Por exemplo, uma célula que esteja a uma distância de 155 m de ambos os solos adjacentes de uma zona de transição receberá um $V_{transição_final}$ igual a soma da metade dos postos atribuídos a esses solos, pois estará sob paridade de influência de cada um deles.

FIGURA 3.27 – APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY POR MEIO DE FUNÇÕES LINEARES DECRESCENTES RELATIVA ÀS CLASSES DE SOLO LÍMITROFES.



Por conseguinte, para o cálculo do $V_{transição_final}$ de cada uma das células constantes da zona de transição, foi utilizada a Eq.(19) (ROSS, 2010). Essa equação implementa a Lógica *Fuzzy* por meio da soma de duas funções lineares decrescentes (FIGURA 3.27) referentes às classes de solo limítrofes *a* e *b*.

$$V_{transição_final} = \frac{(L_z - D_a) * P_a}{L_z} + \frac{(L_z - D_b) * P_b}{L_z}, \quad (19)$$

em que L_z é a largura da zona de transição – neste estudo igual a 310 m –; D_a é a distância entre a célula de cálculo e a classe de solo *a*; D_b é a distância entre a célula de cálculo e a classe de solo *b*; e P_a e P_b os postos para, respectivamente, os solos *a* e *b* dados pela TABELA 3.9.

3.2.5 Tipo de rodado

A interação entre o rodado e a superfície do terreno é um fenômeno complexo e ainda pouco compreendido (MAJDOUBI; MASMOUDI; ELHARIF, 2024). Os rodados de viaturas são estruturas anisotrópicas de difícil modelagem e os mecanismos de interação entre eles e o solo não são completamente claros, o que os tornaram fontes de inúmeras pesquisas nos últimos anos (ZENG *et al.*, 2023).

O tipo de rodado foi a característica inerente à viatura modelada neste estudo, por representar o elemento de contato entre a viatura e o terreno. Para tanto, foram considerados três tipos de pneus para viaturas sobre rodas e um sistema de rodagem sobre lagartas (QUADRO 3.7).

QUADRO 3.7 – TIPOS DE RODADO, INDICAÇÕES DE USO E IMPLICAÇÕES NA TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS.

Tipo de rodado	Abreviatura	Indicação de uso em deslocamentos fora de estrada	Classe de restrições à trafegabilidade
Terreno lamacento (<i>Mud Terrain</i>) (FIGURA 3.28A)	MT	Uso indicado.	Adequada
Todo terreno (<i>All Terrain</i>) (FIGURA 3.28B)	AT	Características mistas entre os pneus MT e HT, podendo ser usado com restrições.	Restritiva
Asfalto e estrada (<i>Highway Terrain</i>) (FIGURA 3.28C)	HT	Não indicado por possuir características próprias para deslocamentos na malha viária.	Muito restritiva
Lagartas (FIGURA 3.28D)	-	Uso indicado.	Adequada ¹

Nota¹: Conforme Zhai *et al.* (2024), viaturas sobre lagartas têm como vantagens a grande capacidade de carga, baixa pressão exercida no solo e raio de giro mínimo igual a zero, tornando-as ideais para o transporte de pessoal e material em deslocamentos fora de estrada.

FIGURA 3.28 – REPRESENTAÇÃO DOS PNEUS MT (A), AT (B), HT (C) E LAGARTAS (D).



FONTE: Adaptado de Continental (2024).

3.2.6 Análise de Decisão Multicritério (MCDA)

A MCDA foi utilizada como aparato matemático básico na integração das camadas de informação e dados não espacializados. A inferência espacial para a avaliação da trafegabilidade baseou-se no conhecimento especializado, aplicado no

método por meio da ponderação relacionada à importância das variáveis modeladoras do fenômeno.

Ressalta-se que, conforme Silva (2020), a MCDA operacionalizada pelo AHP pode ser aplicada tanto na Lógica Booleana quanto na Lógica *Fuzzy*. Neste estudo, utilizou-se sua forma clássica (Lógica Booleana). Isso significa que as preferências e comparações foram expressas de maneira determinística, sem levar em conta a incerteza dos julgamentos. Logo, os pesos atribuídos para as camadas de informação e dados não espacializados nas comparações pareadas e os postos atribuídos para as classes dessas camadas e dados foram representados por valores exatos.

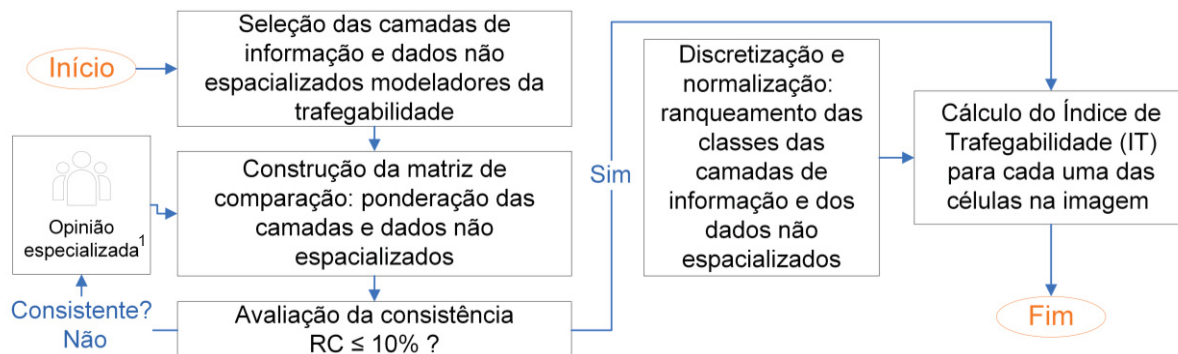
3.2.6.1 Processo Hierárquico Analítico (AHP)

O AHP foi empregado como a técnica de MCDA para a priorização das camadas de informação de precipitação, temperatura, declividade, TRI, TWI, tipo de solo e uso e cobertura da terra – e dos dados não espacializados – tipo de rodado, velocidade média do vento e umidade relativa do ar –, bem como para o ranqueamento das classes de cada uma dessas camadas e dados não espacializados. As camadas de informação de hidrografia, cercas e muros e malhas viárias e edificações não fizeram parte da análise por meio do AHP, por terem classes que por si só impedem (hidrografia, cercas e muros e edificações) ou são adequadas à trafegabilidade de viaturas (malha viária).

Para tanto, seguiu-se o fluxo exibido pela FIGURA 3.29. A importância relativa das camadas de informação e dados não espacializados foi determinada por ponderação aos pares, com o estabelecimento de pesos relativos. Isso possibilitou integrá-los, junto com suas respectivas classes, em um único modelo espacial, a fim de determinar as áreas de restrições à trafegabilidade de viaturas.

A discretização foi usada no agrupamento de valores contínuos das camadas de informação e dados não espacializados em faixas de valores definidos como de mesmo efeito na trafegabilidade de viaturas. A normalização foi utilizada para transformar as classes das camadas de informação e dos dados não espacializados, inicialmente em diferentes unidades de medida de natureza distintas, em elementos comparáveis. Por exemplo, a declividade foi calculada em graus, o uso e cobertura da terra, o TRI e TWI são adimensionais etc. O procedimento de normalização, com emprego da Escala Fundamental de Saaty (1990), é descrito na Subseção 3.2.6.1.3.

FIGURA 3.29 – FLUXO DO AHP PARA A ANÁLISE DA TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS.



Nota 1: Os julgamentos para a aplicação do AHP foram realizados pelo autor deste estudo, considerando a ausência de uma base consolidada de especialistas especificamente voltados à análise da trafegabilidade de viaturas na área de estudo. Para minimizar subjetividades e assegurar a validade metodológica, os pesos foram atribuídos com base na literatura científica revisada, seguindo a Escala Fundamental de Saaty (1990) (QUADRO 3.8), e validados por meio do cálculo da Razão de Consistência (RC), conforme descrito na Subseção 3.2.6.1.2. Essa abordagem permitiu garantir coerência interna e viabilizar a replicação dos procedimentos adotado. Ressalta-se, contudo, que a participação de especialistas nessa etapa de atribuição de pesos poderia agregar maior confiabilidade ao AHP, especialmente em estudos futuros voltados para aplicações práticas específicas. Assim, a inclusão de profissionais com experiência na dinâmica de trafegabilidade de viaturas em diferentes contextos poderia contribuir para o refinamento do processo, reduzindo potenciais vieses individuais e aprimorando a qualidade dos resultados.

3.2.6.1.1 Matriz de comparação e atribuição de pesos

Com uso de julgamento especializado no AHP, este estudo procurou desenvolver uma compreensão abrangente e bem-informada da importância relativa das camadas de informação e dos dados não espacializados. Comparações pareadas foram empregadas, permitindo a tomada de decisão sobre qual deles é relativamente mais importante ou se são igualmente importantes na modelagem da trafegabilidade. Para apoiar essas comparações, foi utilizada a Escala Fundamental de Saaty (1990) (QUADRO 3.8), permitindo a atribuição de valores a cada camada de informação, dado não espacializado e respectivas classes (OZEGIN; ILUGBO; ADEBO, 2024).

QUADRO 3.8 – ESCALA FUNDAMENTAL DE SAATY.

Escala	Importância relativa	Intensidade
9	Extremamente	Mais importante
7	Criticamente	
5	Muito	
3	Moderadamente	
1	Igualmente importante	-
1/3	Moderadamente	Menos importante
1/5	Muito	
1/7	Criticamente	
1/9	Extremamente	
2, 4, 6, 8 e 1/2, 1/4, 1/6, 1/8	Valores intermediários entre julgamentos	-

FONTE: Adaptado de Saaty (1990).

A matriz de comparação formada pela comparação aos pares foi disposta na TABELA 3.6. Os valores apresentados indicam a importância relativa entre as camadas e dados não espacializados avaliados dois a dois. Ressalta-se que esses valores foram obtidos por meio de um processo iterativo de ajuste (melhoria contínua), com a verificação da consistência dos julgamentos anteriormente realizados. A cada iteração, ao ser verificada a inconsistência dos julgamentos (conforme processo disposto na Subseção 3.2.6.1.2), novos julgamentos foram realizados, com posterior verificação da consistência.

TABELA 3.6 – MATRIZ DE COMPARAÇÃO AOS PARES.

Camadas de informação / Dados não espacializados	TWI	TRI	Declividade	Tipo de solo	Uso e cobertura da terra	Temperatura	Precipitação	Umidade relativa do ar	Velocidade média do vento	Tipo de rodado	Pesos (W)
TWI	1	2	1/5	1/3	1/6	3	1/2	4	4	1/4	0,0689
TRI	1/2	1	1/6	1/4	1/7	2	1/3	3	3	1/5	0,0473
Declividade	5	6	1	3	1/2	7	4	8	8	2	0,1987
Tipo de solo	3	4	1/3	1	1/4	5	2	6	6	1/2	0,1254
Uso e cobertura da terra	6	7	2	4	1	8	5	9	9	3	0,2411
Temperatura	1/5	1/2	1/7	1/5	1/8	1	1/4	2	2	1/6	0,0294
Precipitação	2	3	1/4	1/2	1/5	4	1	5	5	1/3	0,0951
Umidade relativa do ar	1/4	1/3	1/8	1/6	1/9	1/2	1/5	1	1	1/7	0,0171
Velocidade média do vento	1/4	1/3	1/8	1/6	1/9	1/2	1/5	1	1	1/7	0,0171
Tipo de rodado	4	5	1/2	2	1/3	6	3	7	7	1	0,1599

Como cada camada é igualmente importante para si mesma, os elementos diagonais da matriz foram iguais a um. Se uma camada de informação ou dado não especializado A é considerado X vezes mais importante do que B para a trafegabilidade, ao valor a_{AB} na matriz de comparação foi atribuído um valor de importância relativa X , conforme valores da Escala Fundamental de Saaty (1990) (QUADRO 3.8).

Após a realização dos julgamentos, os valores de cada linha da matriz de comparação foram somados para obtenção do valor total nas linhas S_i (Eq. (20)). Com base nessa soma, calcula-se o vetor dos pesos W (Eq. (21)) – soma dos valores em cada linha, dividido pelo somatório dos valores de todas as linhas (SAATY, 1990). Obtém-se, assim, a importância relativa (peso relativo – W_i) entre as camadas de informação e dados não especializados comparados.

$$S_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} , \quad (20)$$

$$W_i = \frac{S_i}{\sum_{j=1}^n S_j} , \quad (21)$$

em que a_{ij} é o valor atribuído à comparação aos pares na matriz de comparação, S_i é a soma de cada linha i da matriz de comparação aos pares e W_i é o peso relativo.

As camadas de informação e dados não especializados de maior influência na trafegabilidade de viaturas, respectivamente, uso e cobertura da terra (24,11%), declividade (19,87%), tipo de rodado (15,99%) e tipo de solo (12,54%), receberam pesos finais mais elevados, enquanto os dados não especializados de menor influência – umidade relativa do ar e velocidade média do vento – receberam pesos mais baixos, ambos com 1,71%.

3.2.6.1.2 Exame de consistência

As comparações entre pares das camadas de informação e dados não especializados foram realizadas por meio de opinião especializada, com certo grau de subjetividade. Infere-se, assim, que determinados níveis de variabilidade sejam possíveis. Para o exame de consistência dos julgamentos realizados no AHP, calcularam-se inicialmente os valores λ_i para cada linha pela Eq. (22). A média (Eq.

(23)) dos valores de λ_i é uma aproximação do autovalor máximo λ_{max} da matriz de comparação (SAATY, 1990).

$$\lambda_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} W_j}{W_i}, \quad (22)$$

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{n}, \quad (23)$$

em que a_{ij} é cada julgamento realizado na matriz de comparação. Com base no autovalor máximo λ_{max} , calculou-se o Índice de Consistência (IC) (Eq. (24)), em que o numerador apresenta o desvio entre λ_{max} e n . Por seu turno, o denominador é o grau de liberdade da matriz de comparação (SAATY, 1990).

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}, \quad (24)$$

em que n é o número de camadas de informação e dados não especializados utilizados na modelagem da trafegabilidade que tenham sido ponderados no AHP. O Índice Aleatório (*Random Index – RI*) padronizado (TABELA 3.7) foi aplicado para avaliar a consistência das comparações realizadas e verificar se elas não seriam simplesmente o resultado do acaso (SAATY, 1990).

TABELA 3.7 – VALORES TABELADOS DE ÍNDICE ALEATÓRIO (RI). O RI MÉDIO É DERIVADO DE UMA AMOSTRA DE MATRIZES RECÍPROCAS GERADAS ALEATORIAMENTE USANDO AS ESCALAS 1/9, 1/8, ..., 8 E 9.

Total de camadas de informação e dados não especializados (n) =>	6	7	8	9	10	11	12
RI =>	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,54

FONTE: Adaptado de Saaty (1990).

Por fim, realizou-se o cálculo da *RC* (Eq. (25)) (SAATY, 1990).

$$RC = \frac{IC}{RI}, \quad (25)$$

A *RC* obtida foi igual a 0,049 (4,9%), conforme listado na TABELA 3.8. Uma vez que a *RC* ficou abaixo de 0,1 (10%), presume-se que a matriz de comparação obtida do julgamento especializado é consistente, objetiva e os erros são aceitáveis,

permitindo-se empregar os pesos calculados para cada uma das camadas de informação e dados não espacializados na modelagem da trafegabilidade.

TABELA 3.8 – VALORES DAS VARIÁVEIS EMPREGADAS NO EXAME DE CONSISTÊNCIA.

Variável	Valor
λ_{max}	10,663
n	10
IC	0,074
RI	1,490
RC	0,049

3.2.6.1.3 Ranqueamento de classes

Para o ranqueamento das classes das camadas de informação e dados não espacializados (TABELA 3.9), foi utilizada a Escala Fundamental de Saaty (1990) (QUADRO 3.8). As classes são os indicadores específicos para avaliar a trafegabilidade e foram selecionadas com base em sua relevância na modelagem do fenômeno.

Por sua vez, o posto indica o quanto uma determinada classe auxilia ou dificulta a trafegabilidade, tendo com esta correlação positiva. Logo, quanto maior o posto dado a uma classe, melhor a trafegabilidade na célula que contenha essa classe. Em outras palavras, a cada uma das classes foi atribuído um posto específico, que reflete de forma quantitativa se uma determinada classe afeta negativamente a trafegabilidade (caso em que seu posto será mais próximo de um) ou tem efeito favorável sobre o fenômeno (caso em que seu posto é alto, próximo ou igual a nove).

Ressalta-se que a atribuição de postos foi realizada de forma empírica pelo autor deste estudo com base na literatura revisada. No entanto, ressalta-se que a inclusão de especialistas nas diferentes áreas associadas às camadas e dados não espacializados modeladores da trafegabilidade poderia agregar maior confiabilidade ao processo. Com isso, a participação de profissionais com expertise específica em relevo, solo, hidrografia, vegetação e outras variáveis influentes contribuiria para um refinamento dos postos atribuídos, reduzindo potenciais vieses e aprimorando a acurácia dos resultados obtidos.

TABELA 3.9 – RANQUEAMENTO DE CLASSES. 1: OBSTÁCULOS ABSOLUTAMENTE IMPORTANTES À TRAFEGABILIDADE; 3: OBSTÁCULOS MUITO IMPORTANTES; 5: OBSTÁCULOS IMPORTANTES; 7: OBSTÁCULOS LIGEIRAMENTE IMPORTANTES; 9: OBSTÁCULOS DE PEQUENA IMPORTÂNCIA; 2, 4, 6 E 8: VALORES INTERMEDIÁRIOS DOS JULGAMENTOS.

(CONTINUA)

Camada de informação / Dado não espacializado	Classes	Posto / Classe de restrição à trafegabilidade
TWI ¹	< 8	9
	8 – 12	6
	12 – 16	4
	≥ 16	1
TRI ³	< 1	9
	1 – 2	7
	2 – 3	5
	3 – 4	3
	4 – 5	2
	5 – 6	1
	≥ 6	Impeditiva ⁵
Declividade ² (graus)	< 7	9
	7 – 14	7
	14 – 21	6
	21 – 28	4
	28 – 35	3
	35 – 40	1
	≥ 40	Impeditiva ⁵
Tipo de solo	Cambissolo húmico aluminico muito argiloso profundo	3
	Cambissolo húmico aluminico argiloso pouco profundo	5
	Argissolo vermelho-amarelo distrófico latossólico	6
	Neossolo litólico chernossólico	9
Uso e cobertura da terra	Vegetação densa	Impeditiva ⁵
	Parque	3
	Vegetação rasteira	8
	Lavoura	Impeditiva ⁵
	Solo exposto	9
	Curso/corpos d'água	Impeditiva ⁵
Malha viária e edificações	Estrada pavimentada	Extremamente adequada ⁴
	Estrada não pavimentada	Muito adequada ⁴
	Edificações	Impeditiva ⁵
Hidrografia	Cursos e corpos d'água	Impeditiva ⁵
Temperatura (°C)	< 10	1
	10 – 15	3
	15 – 20	5
	20 – 25	7
	25 – 30	8
	≥ 30	9
Precipitação (mm)	< 50	9
	50 – 100	7
	100 – 150	5
	150 – 200	3
	≥ 200	1
Tipo de rodado	MT	8
	AT	4
	HT	1
	Lagartas	9

TABELA 3.9 – RANQUEAMENTO DE CLASSES. 1: OBSTÁCULOS ABSOLUTAMENTE IMPORTANTES À TRAFEGABILIDADE; 3: OBSTÁCULOS MUITO IMPORTANTES; 5: OBSTÁCULOS IMPORTANTES; 7: OBSTÁCULOS LIGEIRAMENTE IMPORTANTES; 9: OBSTÁCULOS DE PEQUENA IMPORTÂNCIA; 2, 4, 6 E 8: VALORES INTERMEDIÁRIOS DOS JULGAMENTOS.

(CONCLUSÃO)

Camada de informação / Dado não espacializado	Classes	Posto / Classe de restrição à trafegabilidade
Umidade relativa do ar (%)	< 20	9
	20 – 40	7
	40 – 60	5
	60 – 80	3
	≥ 80	1
Velocidade média do vento (m/s)	< 1	1
	1 – 3	3
	3 – 6	5
	6 – 10	7
	≥ 10	9
Cercas e muros	Cercas e muros	Impeditiva ⁵

Nota¹: TWI adaptado da escala definida por Khan, Kashif e Shah (2021);

Nota²: Declividade conforme escala definida por He *et al.* (2023);

Nota³: Faixa de valores e posto adaptados do estudo de Potic *et al.* (2024) e Riley, Degloria e Elliot (1999);

Nota⁴: Célula definida como muito adequada e extremamente adequada, independentemente das demais classes de células homólogas, por ser servida por malha viária; e

Nota⁵: Célula definida como impeditiva, independentemente das demais classes presentes nas células homólogas, pois possui ao menos uma classe que por si só impossibilita a trafegabilidade de viaturas.

3.2.6.2 Índice de Trafegabilidade (IT)

O Índice de Trafegabilidade (IT) reflete o grau de adequação à trafegabilidade. Esse índice foi determinado em escala contínua de 0 a 10, sendo que quanto mais próximo de 10, mais adequada (menos restritiva) à trafegabilidade será a célula. O IT de cada célula ($IT_{x,y}$) foi obtido por meio da Eq. (26), somando-se os valores dados pela multiplicação do peso (W_i , TABELA 3.6) da camada de informação ou dado não espacializado pelo posto (I_i , TABELA 3.9) atribuído à classe (HE *et al.*, 2023).

$$IT_{x,y} = \sum_{i=1}^n W_i I_i , \quad (26)$$

Para as classes definidas como impeditivas, conforme TABELA 3.9, foi atribuído o valor de IT igual a zero, enquanto para a classe estrada pavimentada (extremamente adequada) foi definido IT igual a 10, e para a classe estrada não pavimentada (muito adequada) foi definido IT igual a 9,5. As células que não continham nenhuma dessas classes tiveram seus respectivos valores atribuídos por meio da Eq. (26), com variação de IT de um (valor mínimo possível) a nove (valor máximo possível) por célula.

3.2.7 Transformação para classes de restrições à trafegabilidade

A técnica de agrupamento de dados utilizada para determinar a melhor disposição dos ITs nas diferentes classes de restrições à trafegabilidade foi as Quebras Naturais (*Natural Breaks*) de Jenks (1967). Essa técnica identifica padrões nos dados, agrupando valores similares e estabelecendo divisões onde ocorrem mudanças significativas. Visam-se, com essa técnica, reduzir a variância dentro das classes e maximizar a variância entre as classes. Em outras palavras, essa técnica busca minimizar a variabilidade interna dentro de cada classe e, ao mesmo tempo, maximizar a variabilidade entre as classes, criando limiares de divisão mais representativos da distribuição real dos dados (JENKS, 1967).

Dessa forma, os limiares de classe não são arbitrários, mas determinados adaptativamente conforme a distribuição dos ITs. Isso significa que os intervalos finais refletem melhor as transições naturais entre áreas com diferentes níveis de restrição à trafegabilidade. A escolha pelas Quebras Naturais foi realizada com base em Pokonieczny (2018), sendo que esse algoritmo obteve um desempenho satisfatório em testes para a distribuição de classes de restrições à trafegabilidade de viaturas, superando os algoritmos de Faixa Igual, Quantil, Tangente Hiperbólica, Logística e Quadrático.

As correspondências estabelecidas entre as classes de restrições à trafegabilidade e os ITs provenientes da MCDA podem ser observados na TABELA 3.10. Para a obtenção de cada um dos intervalos de classe pelas Quebras Naturais de Jenks, foi realizada uma coleta de ITs em um total de 778.348 pontos amostrais no mapa de trafegabilidade de viaturas, por amostragem aleatória sistemática, com intervalo de coleta a cada 8 m. Posteriormente, esses valores foram submetidos à função de Quebras Naturais de Jenks para arquivos vetoriais no QGIS.

TABELA 3.10 – INTERVALOS DE ITS PARA CLASSES DE RESTRIÇÕES À TRAFEGABILIDADE PELAS QUEBRAS NATURAIS DE JENKS.

Classes de restrições à trafegabilidade de viaturas	Intervalo de classe
Adequada	$6,88 < IT \leq 10$
Pouco restritiva	$5,97 < IT \leq 6,88$
Restritiva	$4,69 < IT \leq 5,97$
Muito restritiva	$0 < IT \leq 4,69$
Impeditiva	$= 0$

3.2.8 Automação de rotas

Para a automação de rotas, analisaram-se as possíveis rotas hipotéticas que poderiam ser trafegáveis por uma viatura que se desloca entre dois pontos (origem e destino) no terreno. Essa automação determinística de rotas consistiu em duas fases principais: inicialmente elaborou-se o mapa de trafegabilidade de viaturas; posteriormente, buscaram-se as rotas sobre uma superfície de custo derivada desse mapa com emprego do algoritmo de Dijkstra, operacionalizado por meio da função de cálculo de rotas (*functor calc pathway map*) do *Dinamica EGO*.

As rotas preferencial, razoável e desafiadora foram calculadas sobre superfícies de custo distintas geradas com o estabelecimento de diferentes custos para as classes de restrições à trafegabilidade fora de estrada e para a malha viária do mapa de trafegabilidade de viaturas (TABELA 3.11). A lógica subjacente está em estabelecer custos mais próximos entre classes de restrições à trafegabilidade para a rota desafiadora e custos mais espaçados entre as classes para a rota preferencial.

TABELA 3.11 – CUSTOS ESTABELECIDOS PARA A GERAÇÃO DE TRÊS DIFERENTES SUPERFÍCIES DE CUSTO DE CÁLCULO DAS ROTAS PREFERENCIAL, RAZOÁVEL E DESAFIADORA.

Malha viária?	Classe de restrição à trafegabilidade / malha viária	Custo das células das superfícies de custo		
		Rota preferencial	Rota razoável	Rota desafiadora
Não (fora de estrada)	Muito restritiva	17280	1280	25
	Restritiva	2880	320	20
	Pouco restritiva	480	80	15
	Adequada	80	20	10
Sim	Estrada não pavimentada	5	5	5
	Estrada pavimentada	1	1	1

Para a definição das superfícies de custo, foram atribuídos custos específicos para as diferentes classes de restrição à trafegabilidade (adequada à muito restritiva). Em todas as superfícies, o custo foi fixado em um para estradas pavimentadas e cinco para estradas não pavimentadas, diferenciando as vias de acordo com as diferentes restrições impostas à trafegabilidade. Por seu turno, os custos das classes de restrição à trafegabilidade foram atribuídos de forma diferenciada para cada tipo de rota. Para a construção das superfícies de custo associadas a essas rotas, foram utilizadas operações matemáticas distintas, conforme descrito a seguir:

a) rota preferencial: foi atribuído um custo inicial de 80 (classe adequada), com os demais custos para as classes de restrição à trafegabilidade obtidos por meio de uma progressão geométrica de razão seis, visando-se à otimização da superfície de custo para roteamentos por áreas mais adequadas;

b) rota razoável: foi atribuído um custo inicial de 20 (classe adequada), com os demais custos para as classes de restrição à trafegabilidade obtidos por meio de uma progressão geométrica de razão quatro, visando-se à otimização da superfície de custo para roteamentos em áreas com restrições moderadas; e

c) rota desafiadora: foi atribuído um custo inicial de 10 (classe adequada), com os demais custos para as classes de restrição à trafegabilidade obtidos por meio de uma progressão aritmética de razão cinco, visando-se à otimização da superfície de custo para roteamentos por áreas mais restritivas.

As razões das progressões foram determinadas empiricamente, considerando-se a necessidade de automatizar diferentes tipos de rotas viáveis para a trafegabilidade. Assim, essa abordagem permitiu criar superfícies de custo coerentes com os diferentes graus de restrição à trafegabilidade, refletindo as condições do terreno e a viabilidade de realização de deslocamentos fora de estrada com viaturas. Não obstante, observa-se ser possível a atribuição de custos diversos para as classes de restrição à trafegabilidade, gerando-se diferentes superfícies de custo e, conseqüentemente, permitindo-se a automação de diferentes rotas, o que torna o modelo flexível e ajustável.

Nos testes realizados, observou-se que a atribuição de custos próximos para as classes na superfície de custo da rota desafiadora torna o algoritmo de roteamento mais insensível às restrições à trafegabilidade, com tendência a percorrer rotas mais restritivas. Ao se atribuir custos mais espaçados para as classes, como na superfície de custo da rota preferencial, verifica-se uma maior sensibilidade às restrições à trafegabilidade, o que faz com o que a rota passe por regiões menos restritivas.

Neste estudo, foi verificado que o uso de custos maiores do que os estabelecidos para a superfície de custo da rota preferencial (TABELA 3.11) necessitou de maior processamento computacional, e até a não obtenção da rota em alguns testes realizados. Também, não foram observados ganhos em termos de rota gerada para o tipo preferencial com o maior espaçamento entre os custos além do intervalo [1 (estrada pavimentada) - 17.280 (classe muito restritiva)].

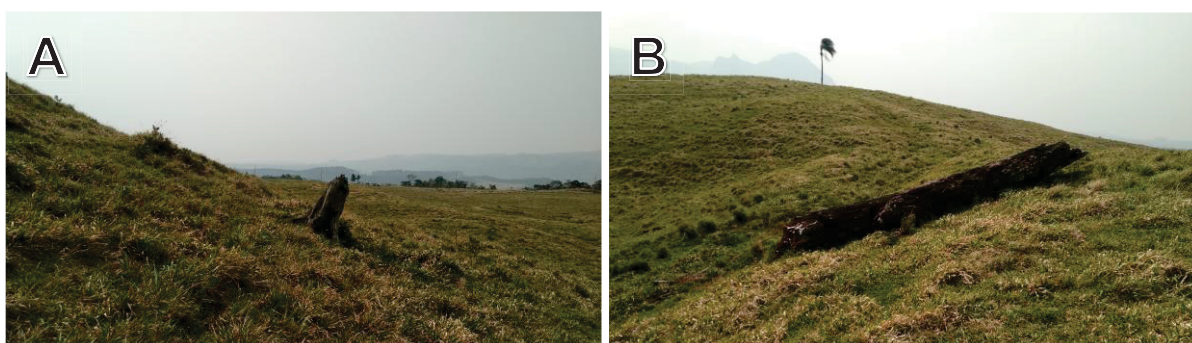
3.2.9 Limitações da modelagem

Alguns fatores considerados relevantes, mas que fugiram ao escopo da modelagem realizada compreendem:

a) características dinâmicas do solo, como temperatura interna, estabilidade estrutural, consistência e rigidez etc., e a interação dinâmica entre a viatura e o solo, geradora de fatores possivelmente influenciadores da trafegabilidade, como compressão, deformação, erosão e afundamento;

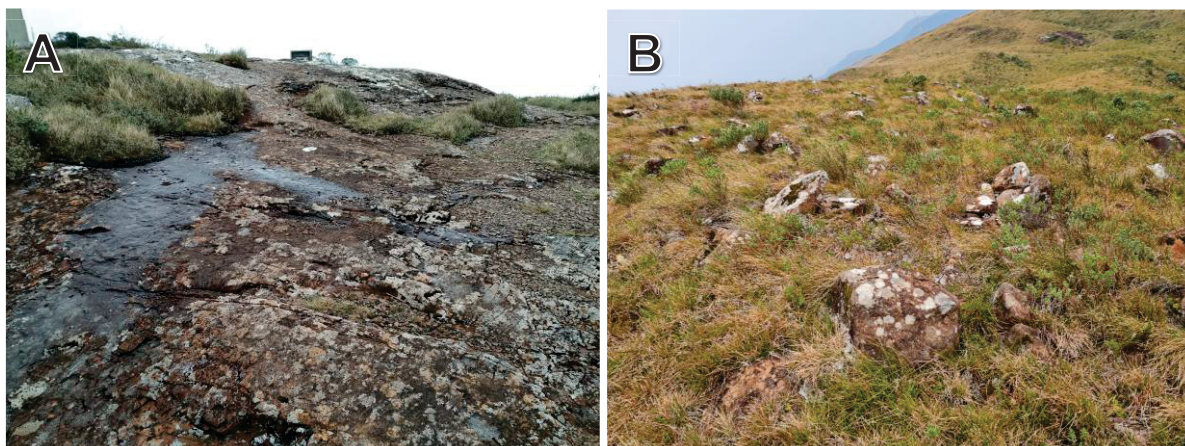
b) obstáculos naturais ou artificiais de pequenas dimensões, que não puderam ser verificados nos insumos utilizados, quer pela resolução espacial, quer pelo tempo a que se referem esses insumos, o que pode tornar a trafegabilidade de viaturas impossível ou perigosa em certas áreas. Como exemplo, verificou-se no terreno troncos de árvores que poderiam impedir a passagem de dada viatura por superar o seu vão livre do solo (FIGURA 3.30);

FIGURA 3.30 – OBJETOS NÃO RECONHECIDOS NAS IMAGENS CBERS 04A-WPM: TRONCO DE ÁRVORE CORTADA AINDA FIXADO AO SOLO (A) E SOLTO NA SUPERFÍCIE (B).



c) matacões acima da superfície do terreno – porção de rocha formada por processos de intemperismo ou abrasão, de tamanho variado entre 0,2 m e 1 m (ABNT, 1995) –, que não foram identificados na camada de informação de uso e cobertura da terra, nem na camada de declividade, por possuírem resolução espacial de, respectivamente, 2 m e 1 m. Ressalta-se que rochas ao nível da superfície do terreno são normalmente adequadas à trafegabilidade (FIGURA 3.31A), ao contrário dos matacões aflorados que superem o vão livre do solo de viaturas (FIGURA 3.31B);

FIGURA 3.31 – ROCHA AFLORADA ADEQUADA À TRAFEGABILIDADE (A) E MATAÇÕES IMPEDITIVOS POR SUPERAREM O VÃO LIVRE DO SOLO DE VIATURAS (B).



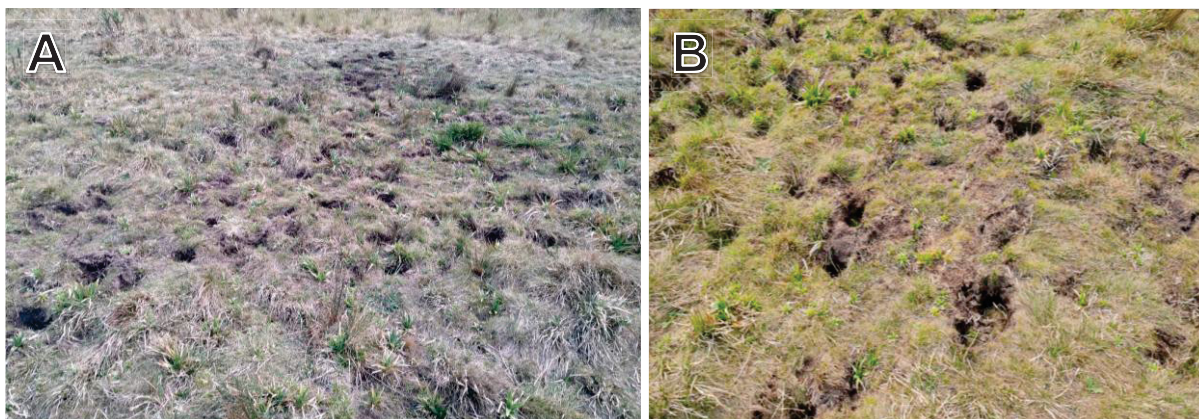
d) características específicas de determinada viatura, como comprimento de rampa máximo, peso, torque, potência, capacidade de submersão, tipo de câmbio, presença de bloqueio do diferencial e marcha reduzida, estrutura em monobloco ou chassi etc. Ainda, não foram contabilizados os efeitos dinâmicos da viatura, derivados de sua interação com as condições ambientais (por isso, de difícil modelagem);

e) interações com o terreno dependentes das características mecânicas dos pneus, como tendência a deformações, efeitos da velocidade, vibrações, calibração, aro e banda de rodagem, material constituinte, processo de fabricação, estado de conservação (novos ou meia-vida) e quantidade de pneus em cada eixo;

f) variáveis relacionadas às capacidades técnicas e pessoais do motorista na condução da viatura;

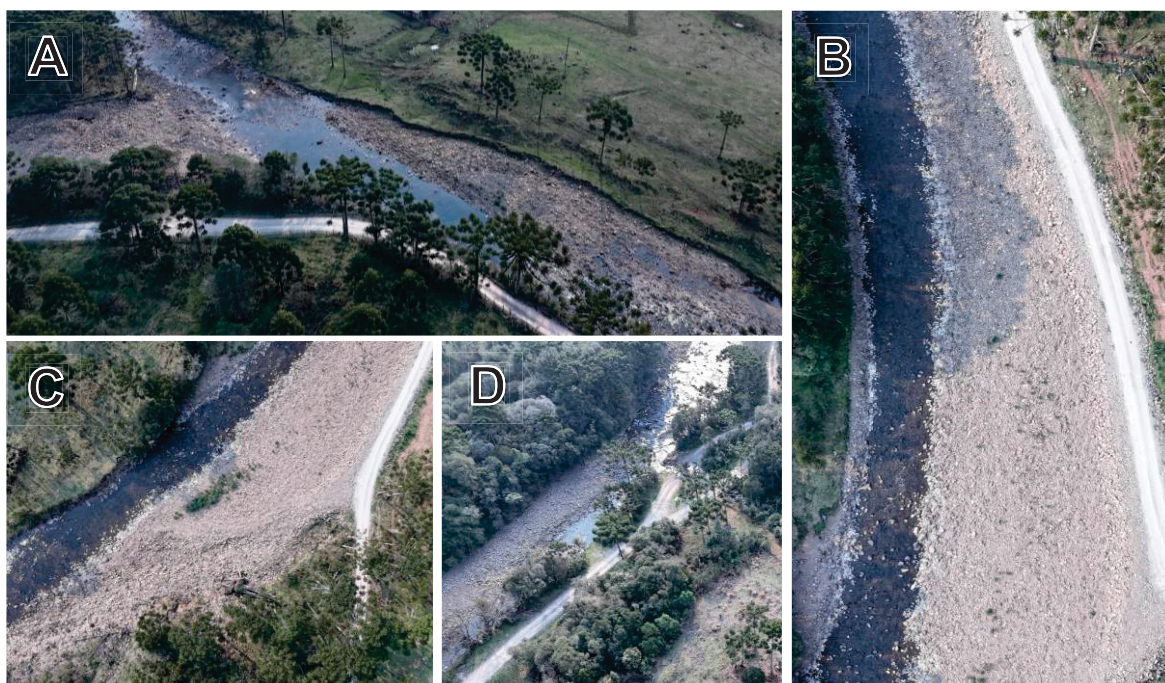
g) solos de turfa (FIGURA 3.32), que dificultam a trafegabilidade, sendo de difícil identificação em processos de classificação de imagens por estarem encobertos por vegetação. Mapas de solos de escalas pequenas e médias, como o utilizado neste estudo, em escala 1:250.000, podem generalizar áreas inteiras em um determinado tipo de solo não condizente com as porções de turfa. Por conseguinte, manchas de solo de pequena dimensão não foram consideradas;

FIGURA 3.32 – SOLO DE TURFA: SECO (A) E ÚMIDO (B).



h) características dos cursos e corpos d'água, como profundidade, velocidade da correnteza e características do fundo, bem como variações sazonais em largura. Como se pode verificar na FIGURA 3.33, áreas de influência dos rios podem ser trafegáveis parte do ano e se tornarem impeditivas a depender de fatores ambientais que fugiram ao escopo deste estudo;

FIGURA 3.33 – CAMINHOS EM ÁREAS DE INFLUÊNCIA DOS RIOS (LEITO SECO), TRAFEGÁVEIS PARTE DO ANO. VISTAS DO RIO CANOAS POR IMAGENS DE DRONE: OBLIQUA OESTE (A), ORTOGONAL (B), ORTOGONAL (C) E OBLIQUA NOROESTE (D).



i) o TWI que assumiu condições de estado estacionário para a umidade, infiltração, transmissividade e outras propriedades do solo. O modelo apresentou, por conseguinte, limitações por não levar em conta as mudanças sazonais e outras

variáveis não topográficas, como propriedades do solo, vegetação, grau de saturação e evapotranspiração. Além disso, a precipitação acumulada em períodos imediatamente anteriores ao deslocamento pode acometer áreas no terreno de modo a torná-las muito restritas ou impeditivas à trafegabilidade;

j) a classe lavoura da camada de informação de uso e cobertura da terra, em que não foi considerada a possibilidade de deslocamento de viaturas durante, por exemplo, o período de pousio ou pós-colheita e em áreas ocupadas por lavouras temporárias. Além disso, em emergências ou em conflitos armados pode haver a necessidade de deslocamentos em áreas ocupadas por lavoura, contexto esse não abordado na modelagem. Por conseguinte, considerou-se essa classe como impeditiva, com base em situações normais de tráfego, não obstante se reconheça a possibilidade de passagem em situações ou épocas específicas;

k) a velocidade média do vento, que foi modelada unicamente tendo em vista a sua relação inversa com a umidade do solo (quanto maior a velocidade do vento, mais rapidamente o solo tende a secar por evaporação). Não obstante, ventos fortes provenientes de eventos climáticos extremos, como tornados ou ciclones, podem desestabilizar a viatura, restringindo ou até mesmo impossibilitando o deslocamento;

l) métricas detalhadas da estrutura florestal, como o espaçamento entre os troncos das unidades vegetais que impeçam ou possibilitem a trafegabilidade. Por exemplo, em áreas de silvicultura, a depender das distâncias entre as linhas de plantio, pode ser possível o deslocamento caso estas superem a largura da viatura; e

m) outros eventos esporádicos, como incêndios de grandes proporções, que podem dificultar deslocamentos seguros com viaturas, tornando áreas antes adequadas à trafegabilidade em restritivas ou impeditivas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente estudo constituiu-se no desenvolvimento de um método para a elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas e automação de rotas. A MCDA operacionalizada pelo AHP foi modelada no *Dinamica* EGO para que fosse possível integrar diferentes camadas de informação e dados não espacializados de interesse para a trafegabilidade, com disposição dos resultados em um mapa de trafegabilidade de viaturas.

Posteriormente, o *Dinamica* EGO foi utilizado para a automação de rotas entre dois pontos (origem e destino) com a integração e adaptação de *functors* constantes da biblioteca dessa plataforma. Por fim, com uso de dados coletados em levantamento de campo e dados auxiliares de SR, foi realizada a validação dos resultados por meio da verificação de estatísticas de qualidade para o mapa de trafegabilidade de viaturas elaborado e para as rotas automatizadas.

4.1 RESULTADOS INTERMEDIÁRIOS (PROCESSAMENTO DAS CAMADAS)

Após a execução do pré-processamento, segmentação, classificação e demais operações sobre o MDT SC 2010-2012 e imagens CBERS 04A-WPM, foram obtidas as camadas de informação de declividade, TWI, TRI (FIGURA 4.1) e uso e cobertura da terra (FIGURA 4.2).

A camada de uso e cobertura da terra com sombra pode ser conferida na FIGURA 4.2A. Aplicando-se o código do filtro de sombras (APÊNDICE 1) – que permite reclassificar as células de sombra para a classe mais frequente entre as células vizinhas por meio de uma vizinhança 8 – obtém-se a camada de informação de uso e cobertura da terra sem regiões de sombra (FIGURA 4.2B). Ressalta-se que esse filtro foi baseado nos ditames da 1ª Lei da Geografia (TOBLER, 1970), em que uma determinada classe está mais relacionada com classes próximas do que com classes distantes. Por conseguinte, as regiões marcadas pela incerteza (classe sombra) tendem a pertencer às classes de sua vizinhança.

FIGURA 4.1 – CAMADAS DE INFORMAÇÃO DE DECLIVIDADE (A), TWI (B) E TRI (C).

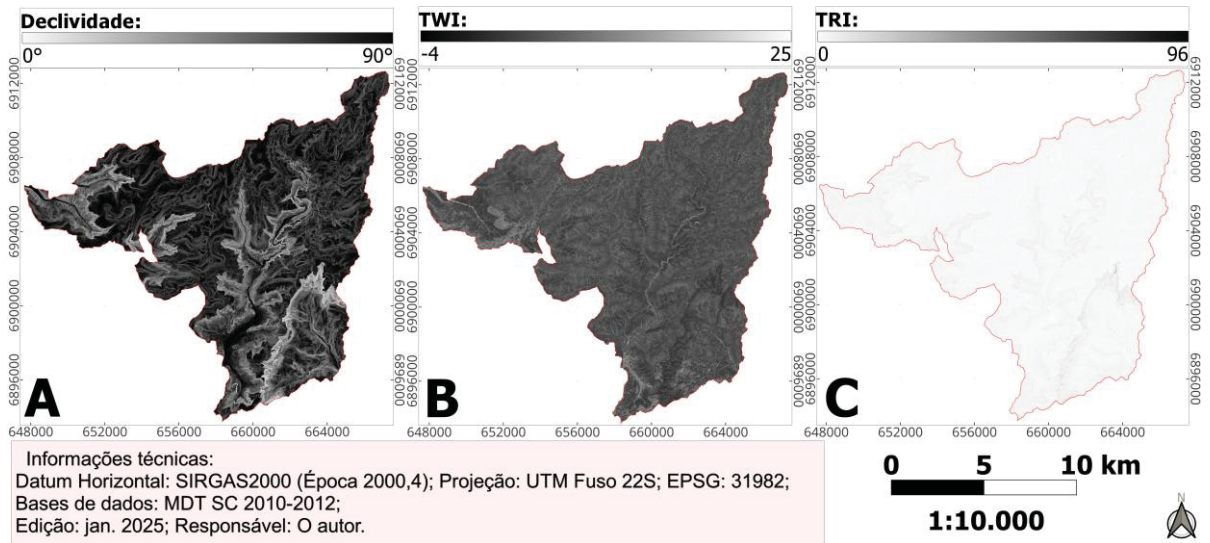
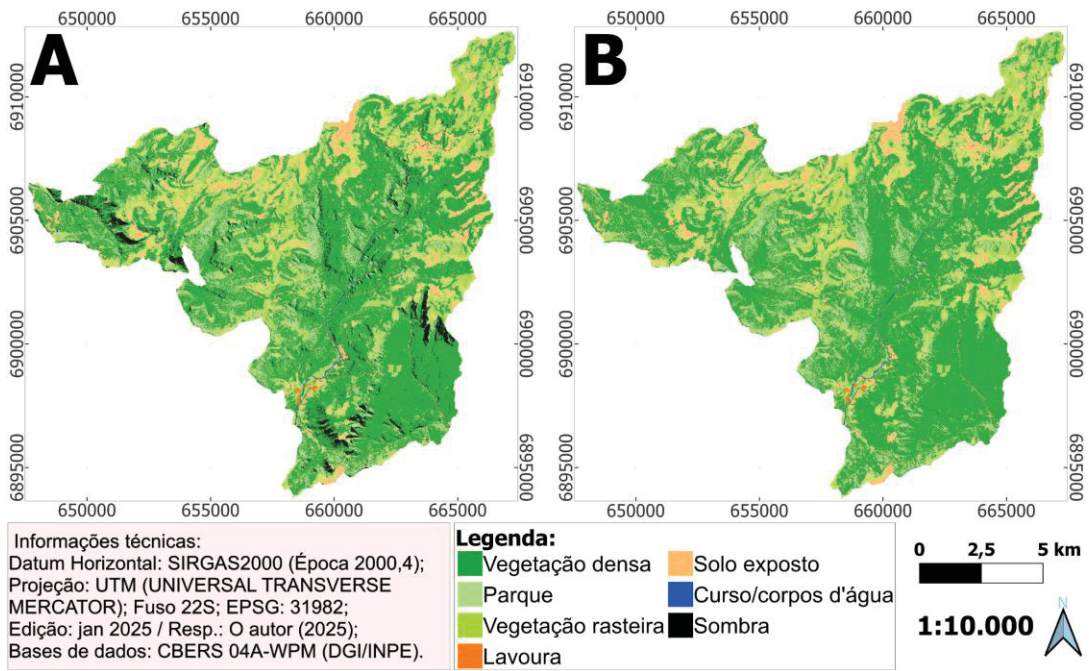


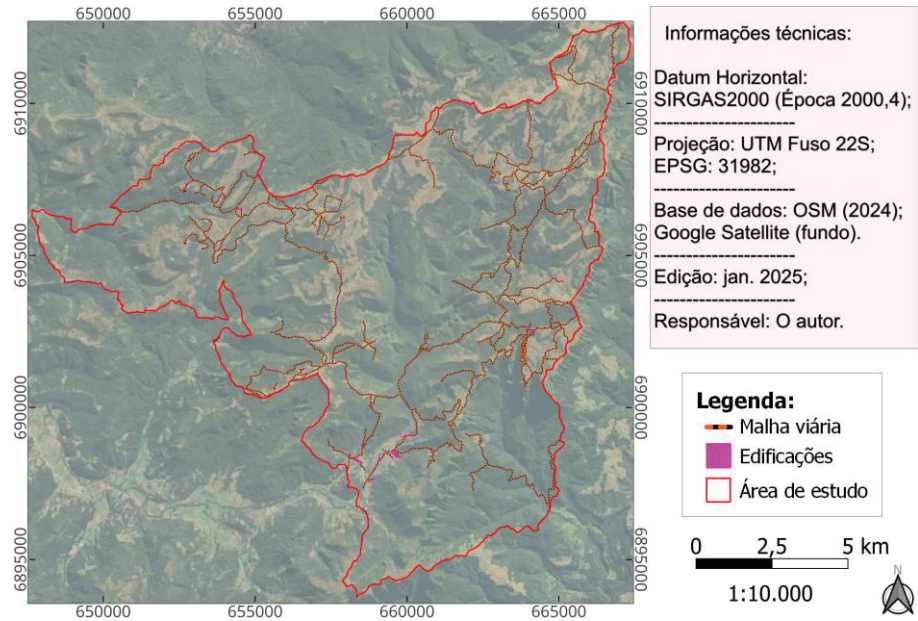
FIGURA 4.2 – CAMADA DE USO E COBERTURA DA TERRA COM REGIÕES DE SOMBRAS (A) E FILTRADA DE REGIÕES DE SOMBRA (B).



Os insumos para a camada de informação de malha viária e edificações (FIGURA 4.3) foram obtidos com uso do OSMDownloader/QGIS. Esse complemento possibilitou obter as feições antrópicas da área de estudo, vetorizadas no escopo do mapeamento colaborativo (*crowdsourcing*) na plataforma OSM. A utilização de dados derivados do mapeamento colaborativo, em que o público contribui para identificar e caracterizar objetos e feições presentes na área de interesse, mostrou-se útil por permitir a obtenção de vias locais vetorizadas. No entanto, foi necessária a

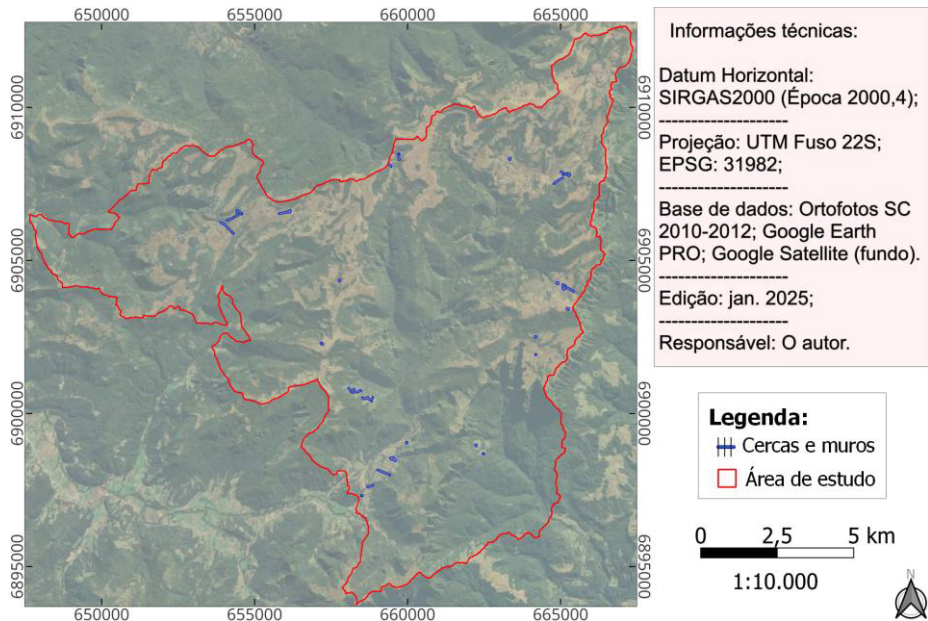
vetorização de vias faltantes e edificações, realizada com o emprego de ortofotos de altíssima resolução espacial provenientes do levantamento aerofotogramétrico SC 2010-2012 (0,39 m) e do Google *Earth Pro*.

FIGURA 4.3 – CAMADA DE INFORMAÇÃO DE MALHA VIÁRIA E EDIFICAÇÕES.



A camada de informação de cercas e muros (FIGURA 4.4) foi em seu inteiro teor obtida por vetorização manual, valendo-se da fotointerpretação de ortofotos SC 2010-2012 e de imagens do Google *Earth PRO*.

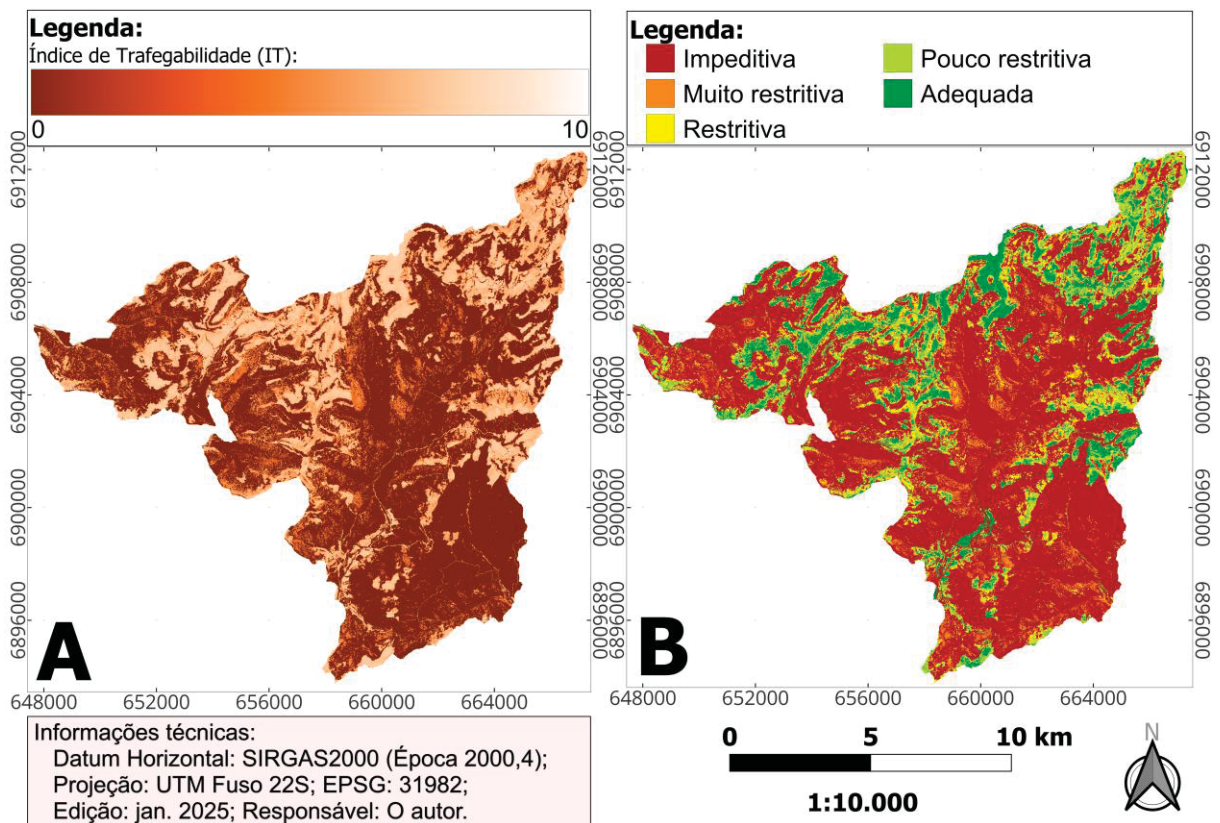
FIGURA 4.4 – CAMADA DE INFORMAÇÃO DE CERCAS E MUROS.



4.2 MAPA DE TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS

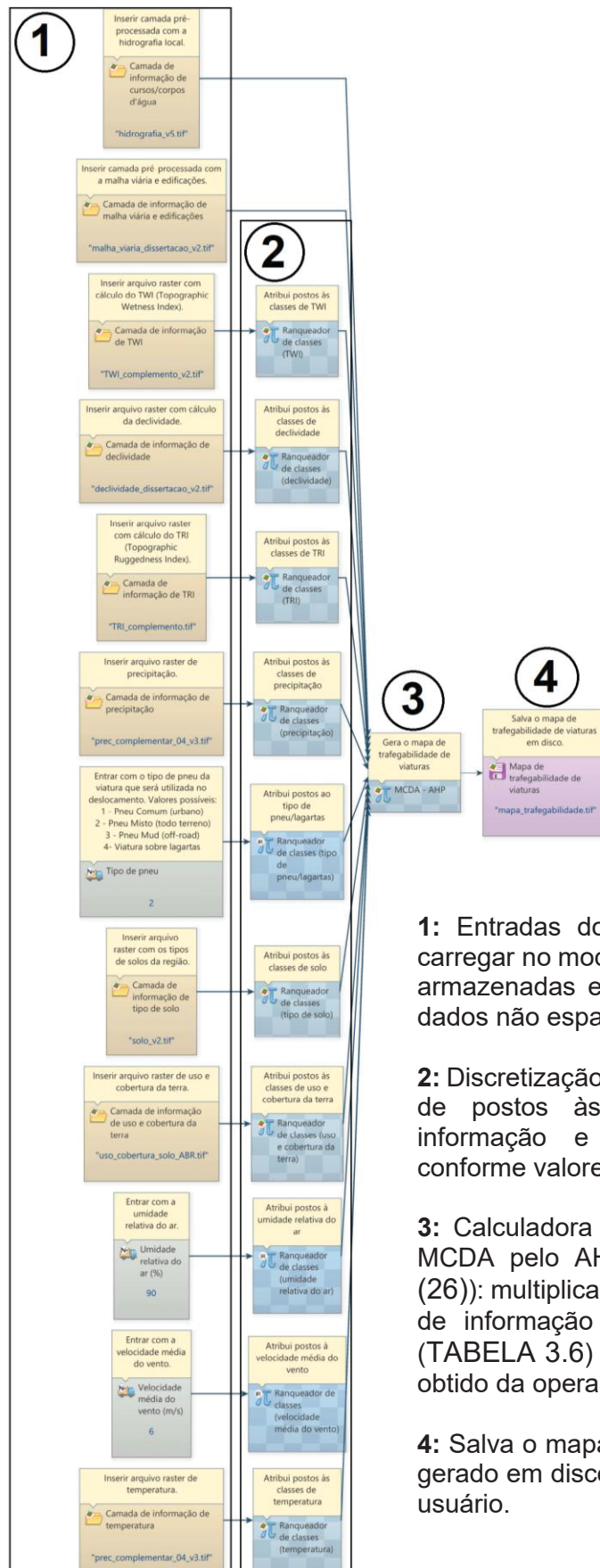
Os mapas de trafegabilidade de viaturas obtidos foram dispostos na FIGURA 4.5. Os valores de ITs variaram entre 0 e 10, em uma escala contínua de valores para o mapeamento da trafegabilidade (FIGURA 4.5A). Com o uso das Quebras Naturais de Jenks, descrito na Subseção 3.2.7, chegou-se ao mapa de trafegabilidade de viaturas em cinco classes de restrições à trafegabilidade – adequada, pouco restritiva, restritiva, muito restritiva e impeditiva – disposto na FIGURA 4.5B.

FIGURA 4.5 – MAPAS DE TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS, PARA VIATURAS COMUNS DE MERCADO COM PNEU AT, DISPOSTO EM ESCALA CONTÍNUA DE IT VARIANDO DE 0 A 10 (A) E EM ESCALA CATEGÓRICA COM CLASSES DE ADEQUADA A IMPEDITIVA, CONFORME QUEBRA NATURAL DE JENKS (B). MAPAS REFERENTES À ESTAÇÃO DO INVERNO. OS MAPAS DAS OUTRAS ESTAÇÕES DO ANO FORAM APRESENTADOS NO APÊNDICE 2.



Para a elaboração dos mapas de trafegabilidade de viaturas, foi desenvolvido o modelo disposto na FIGURA 4.6 na plataforma *Dinamica* EGO. Esse modelo utiliza-se de álgebra de mapas (*functor calculate map*) para a implementação da MCDA operacionalizada pelo AHP, possibilitando a análise da trafegabilidade e tendo como resultado (saída do modelo) um mapa de trafegabilidade de viaturas.

FIGURA 4.6 – MODELO PARA ELABORAÇÃO DE MAPAS DE TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS DESENVOLVIDO NA PLATAFORMA *DINAMICA* EGO.



1: Entradas do modelo: permite ao usuário carregar no modelo as camadas de informação armazenadas em disco e atribuir valores aos dados não espacializados;

2: Discretização e normalização, com atribuição de pesos às classes das camadas de informação e dados não espacializados, conforme valores definidos na TABELA 3.9;

3: Calculadora raster com implementação da MCDA pelo AHP para obtenção do IT (Eq. (26)): multiplicação de cada peso das camadas de informação e dados não espacializados (TABELA 3.6) pelo respectivo posto da célula obtido da operação anterior (2); e

4: Salva o mapa de trafegabilidade de viaturas gerado em disco no caminho especificado pelo usuário.

4.3 ROTAS

Para a automação de rotas sobre o mapa de trafegabilidade de viaturas, foram escolhidos 17 Pontos de Origem-Destino (PODs) no terreno que permitissem interligar regiões notáveis, os quais foram expostos no QUADRO 4.1.

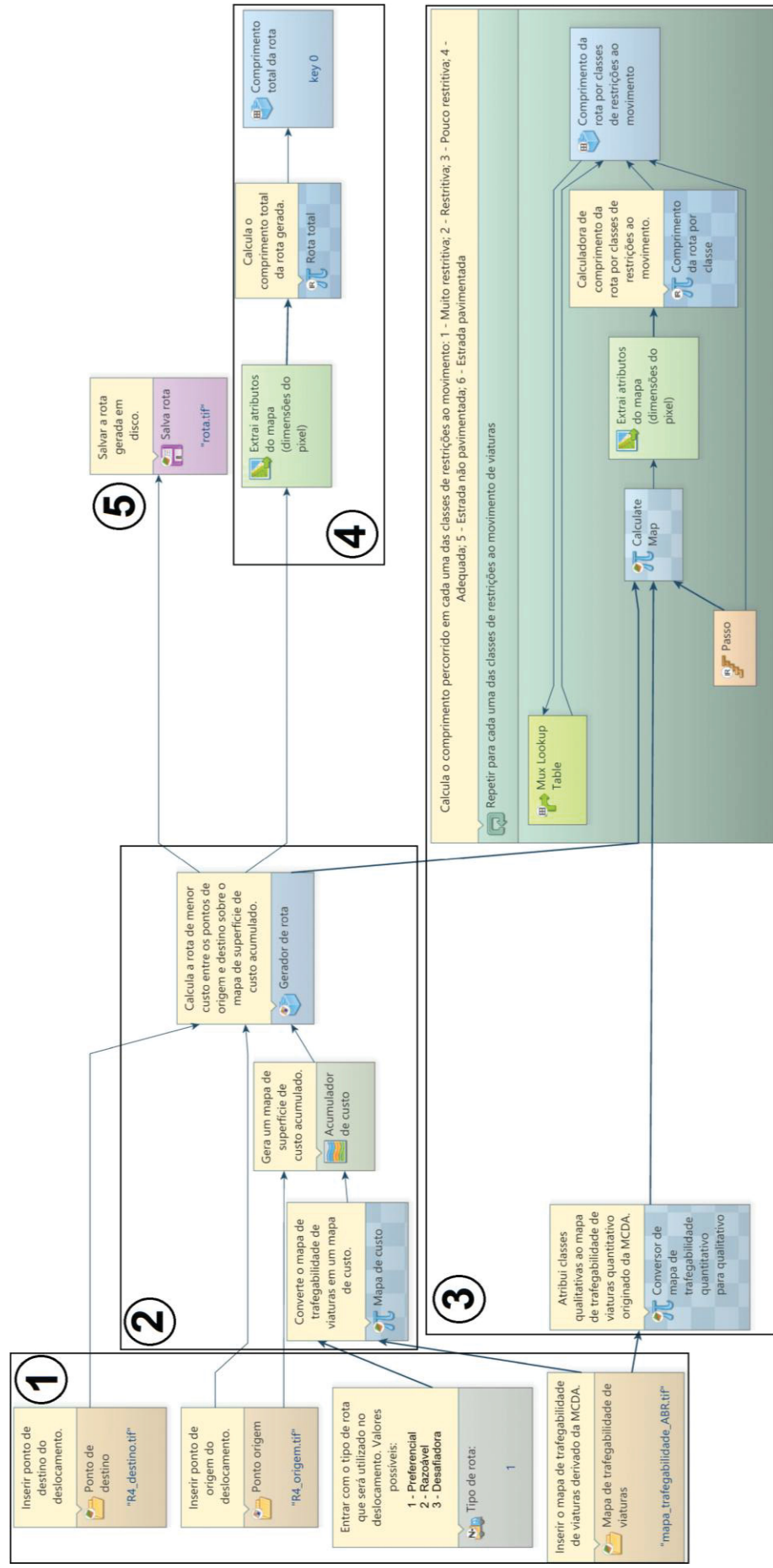
QUADRO 4.1 – LOCALIZAÇÃO DO PONTO DE ORIGEM E DE DESTINO. DATUM HORIZONTAL: SIRGAS2000 (ÉPOCA 2000,4); PROJEÇÃO UTM FUSO 22S; EPSG: 31982.

POD	Ponto de origem	Ponto de destino
R1	Refúgio da Montanha Infinita	Coordenadas (665228,7; 6901812,3)
R2	Refúgio do Espraiado	Pontão da Baía
R3	Abrigo 1500	Coordenadas (654408; 6907644)
R4	Estância Bonin Urubici	Cachoeira Rio dos Bugres
R5	Coordenadas (659142,1; 6907145,9)	Campo Limpo
R6	Coordenadas (661793,4; 6909852,2)	Coordenadas (660211,1; 6905923,5)
R7	Serra da Anta Gorda	Coordenadas (664985,3; 6908631,5)
R8	Coordenadas (652590,1; 6905123,9)	Mirante do Cânion do Rio dos Bugres
R9	Coordenadas (654209; 6904522,2)	Coordenadas (656005,6; 6906036,4)
R10	Topo da Montanha	Coordenadas (661226; 6901492)
R11	Trilha de Santa Bárbara	Coordenadas (664489; 6906210)
R12	Coordenadas (664873; 6906723)	Cemitério Jesuíta
R13	Coordenadas (656253; 6904031)	Coordenadas (658885; 6904170)
R14	Coordenadas (664856; 6904256)	Balanço Infinito
R15	Nascente do Rio Canoas	Passo da Neve
R16	Estacionamento do Altos do Corvo Branco	Mirante da Pirâmide – Altos do Corvo Branco
R17	Coordenadas (651425,09; 6903265,01)	Coordenadas (652614,06; 6904411,87)

Esses pontos foram utilizados no modelo⁷ para automação de rotas (FIGURA 4.7), que faz uso do mapa de trafegabilidade de viaturas, devidamente convertido para um mapa de custo por meio de álgebra de mapas (*functor calculate map*) e cálculo da superfície de custo (*functor calc cost map*). Com isso, esse modelo possibilita a obtenção de rota preferencial, razoável ou desafiadora entre um ponto de origem e outro de destino, com o emprego do gerador de rotas (*functor calc pathway map*) do *Dinamica EGO*.

⁷ Os modelos para a elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas e para a automação de rotas, em formato egomlx do *Dinamica EGO*, encontram-se disponíveis em <<https://github.com/dalmonech/Multicriteria-Decision-Analysis-to-RS-Free-Inputs-in-the-Evaluation-of-Vehicle-Trafficability>>.

FIGURA 4.7 – MODELO DE AUTOMAÇÃO DE ROTAS DESENVOLVIDO NA PLATAFORMA DINAMICA EGO.



Na FIGURA 4.8 foram expostos 17 PODs, cada um com três rotas possíveis – preferencial, razoável e desafiadora – geradas com emprego do modelo de automação de rotas (FIGURA 4.7) e dos pontos de origem e destino dispostos no QUADRO 4.1. Dependendo do tipo de rota escolhido, o modelo evitará as áreas de maior restrição à trafegabilidade, normalmente gerando rotas mais longas (preferencial); ou serão mais curtas, passando por áreas de maior restrição (desafiadora). A rota razoável é uma solução intermediária, que visa oferecer um meio termo entre a rota preferencial e a desafiadora em termos de custo e distância.

FIGURA 4.8 – ROTAS AUTOMATIZADAS DADO UM PONTO DE ORIGEM E OUTRO DE DESTINO. (CONTINUA)

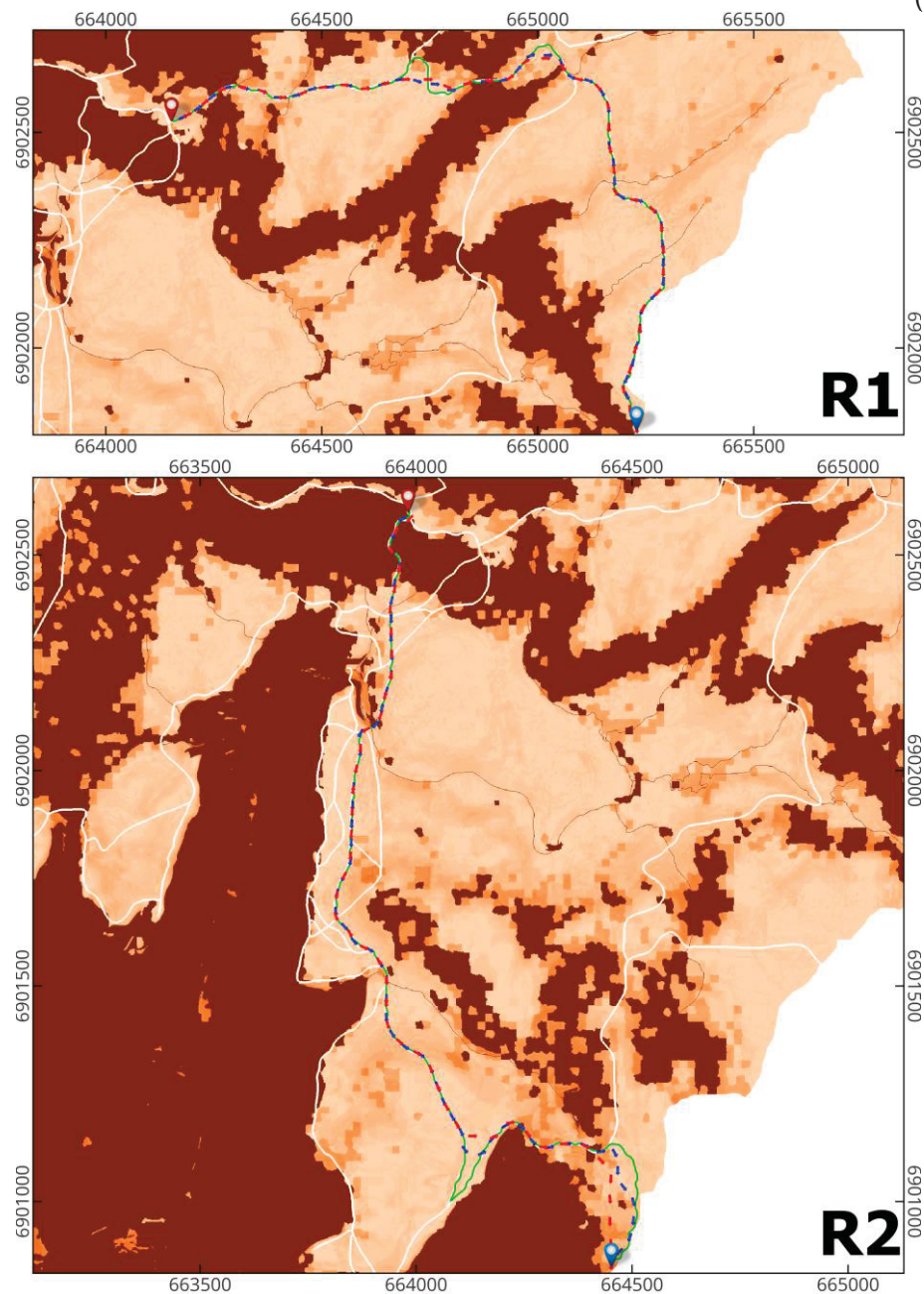


FIGURA 4.8 – ROTAS AUTOMATIZADAS DADO UM PONTO DE ORIGEM E OUTRO DE DESTINO.
(CONTINUAÇÃO)

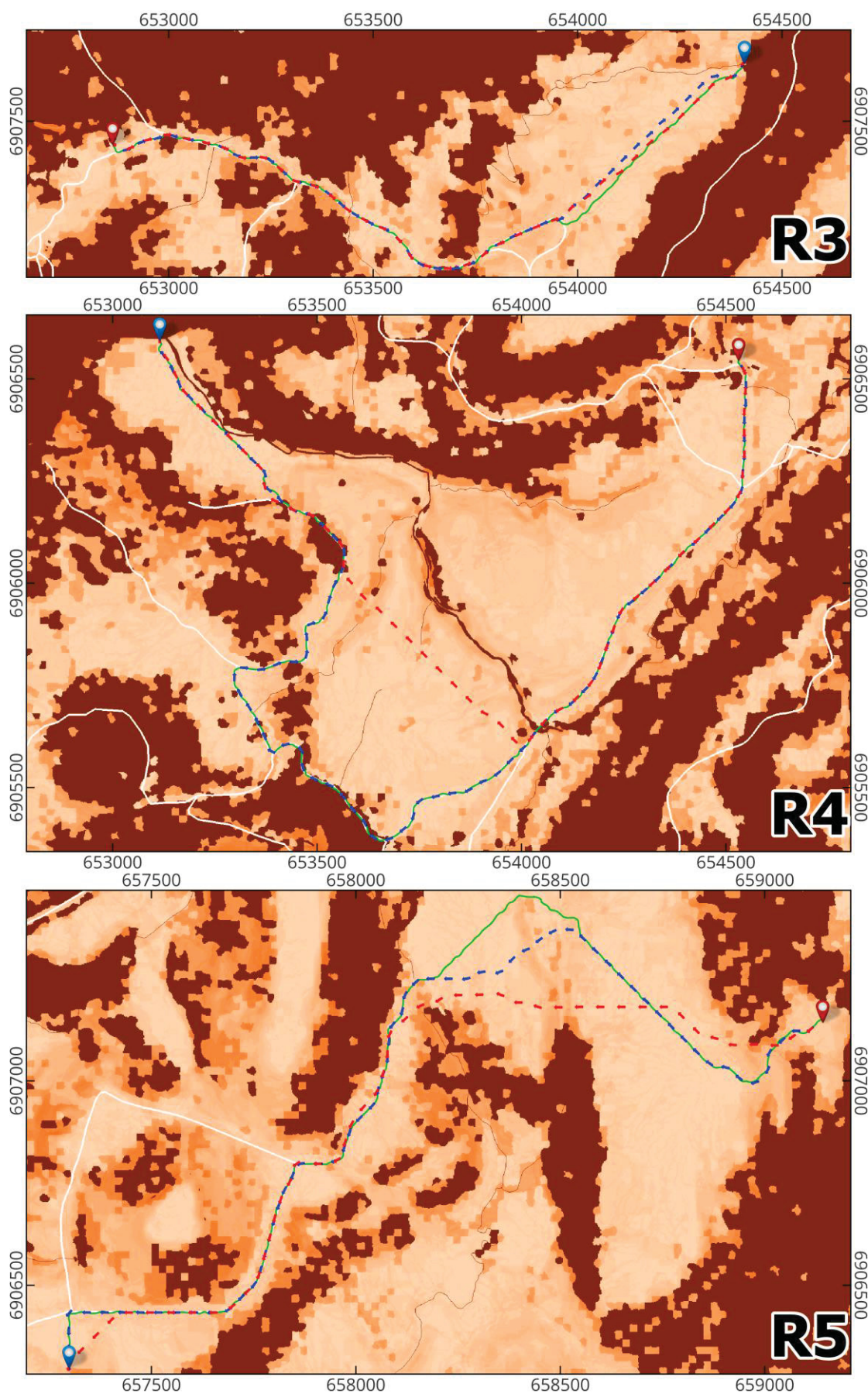


FIGURA 4.8 – ROTAS AUTOMATIZADAS DADO UM PONTO DE ORIGEM E OUTRO DE DESTINO.
(CONTINUAÇÃO)

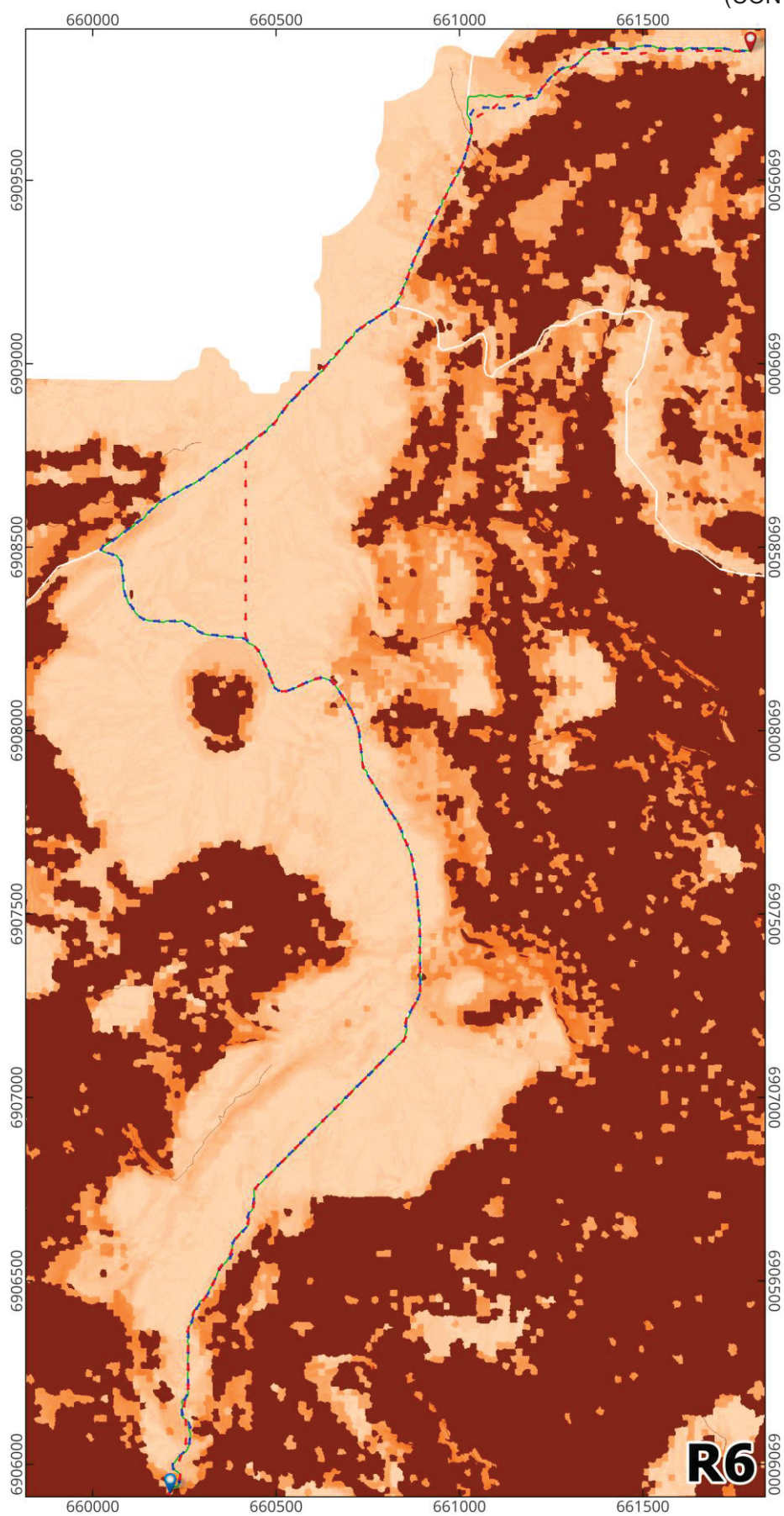


FIGURA 4.8 – ROTAS AUTOMATIZADAS DADO UM PONTO DE ORIGEM E OUTRO DE DESTINO.
(CONTINUAÇÃO)

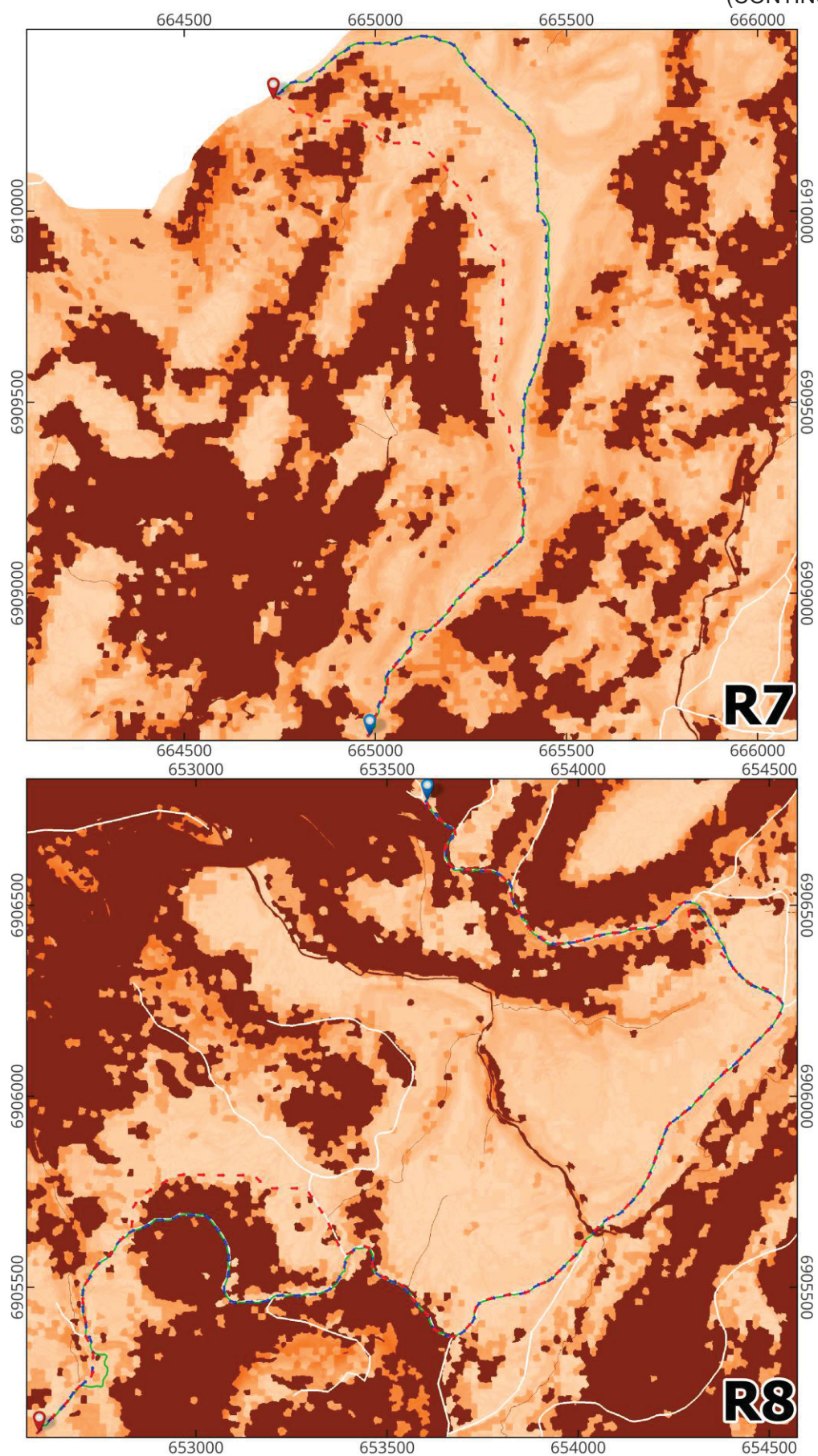


FIGURA 4.8 – ROTAS AUTOMATIZADAS DADO UM PONTO DE ORIGEM E OUTRO DE DESTINO.
(CONTINUAÇÃO)

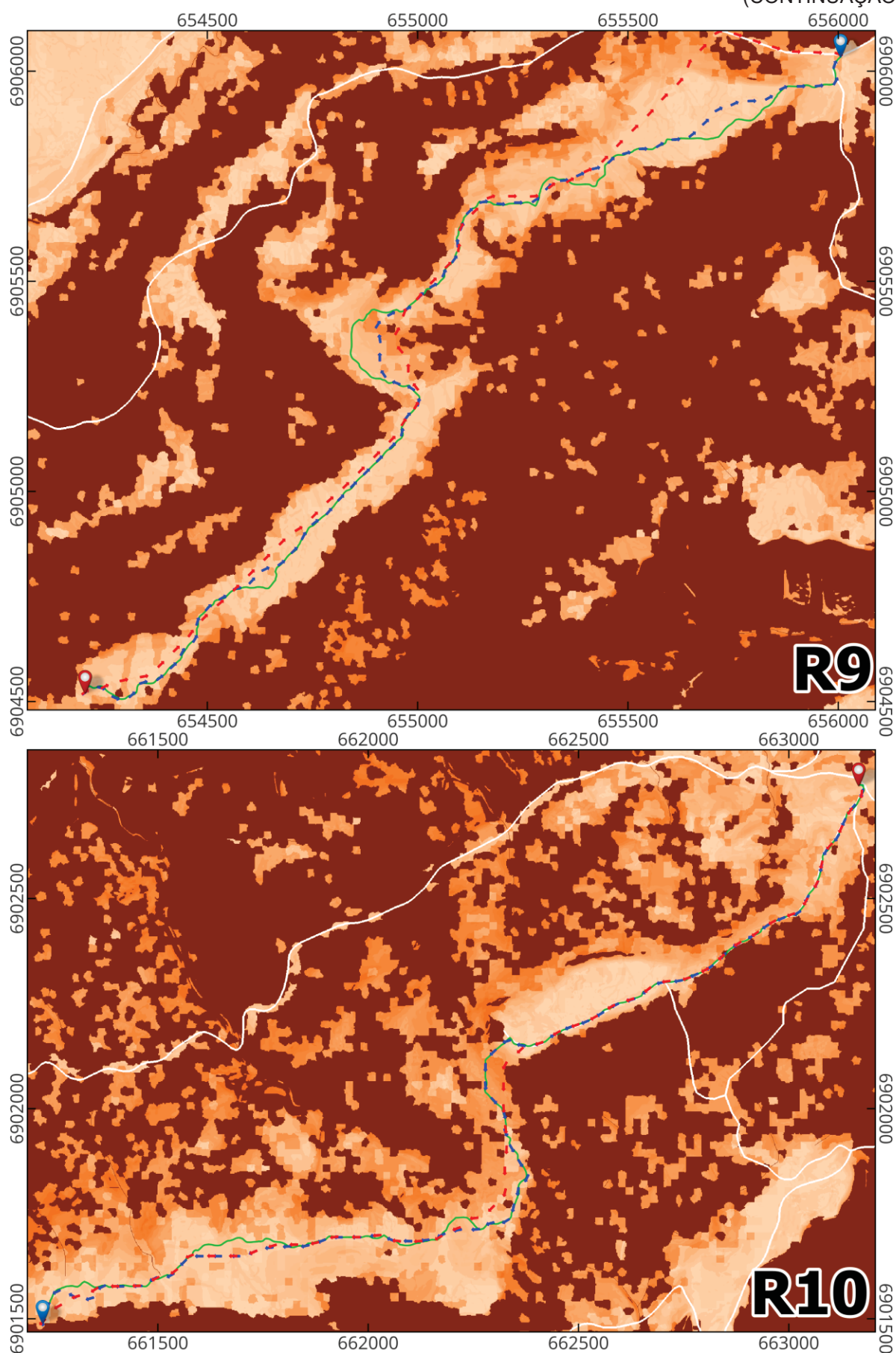


FIGURA 4.8 – ROTAS AUTOMATIZADAS DADO UM PONTO DE ORIGEM E OUTRO DE DESTINO.
(CONTINUAÇÃO)

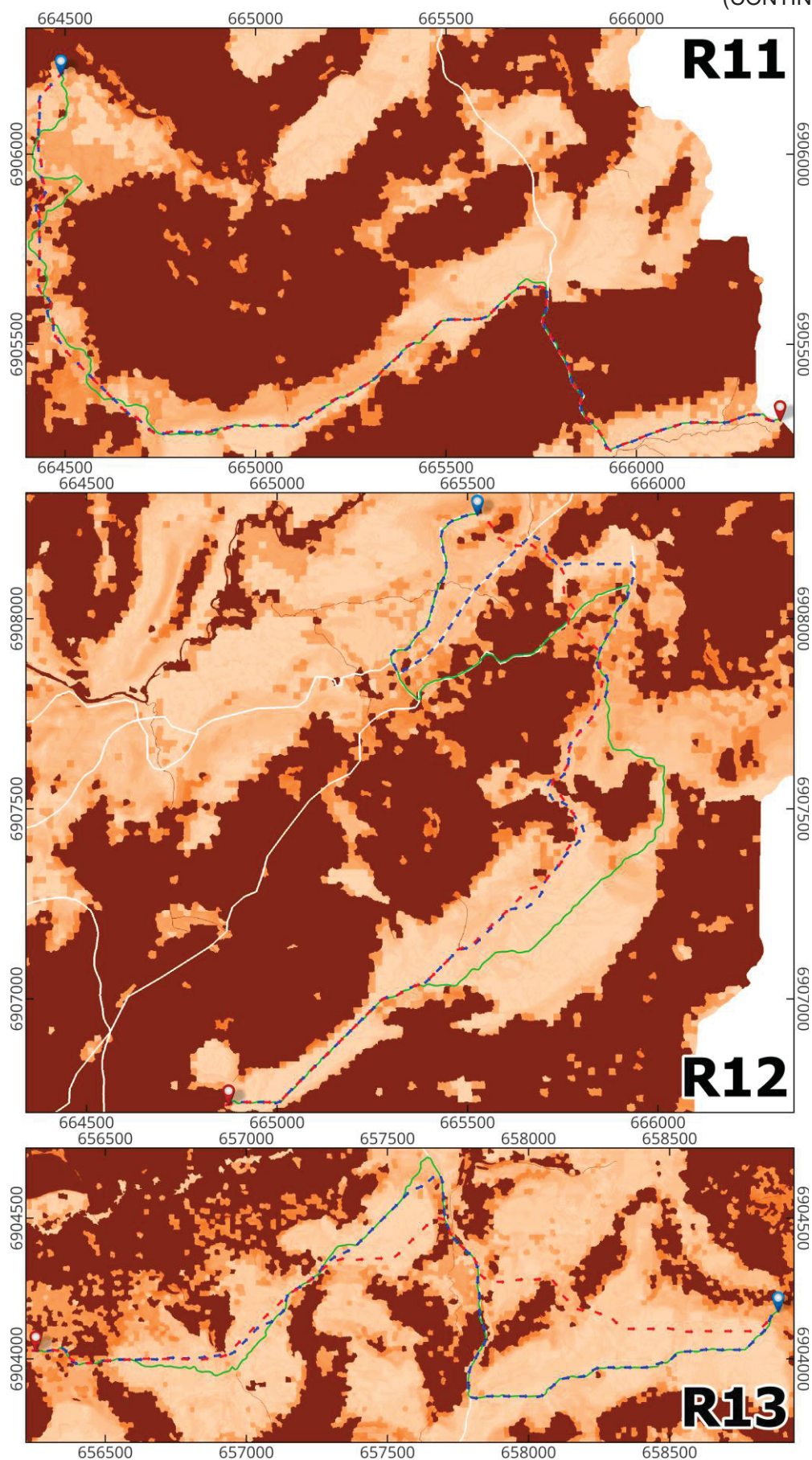


FIGURA 4.8 – ROTAS AUTOMATIZADAS DADO UM PONTO DE ORIGEM E OUTRO DE DESTINO.
(CONTINUAÇÃO)

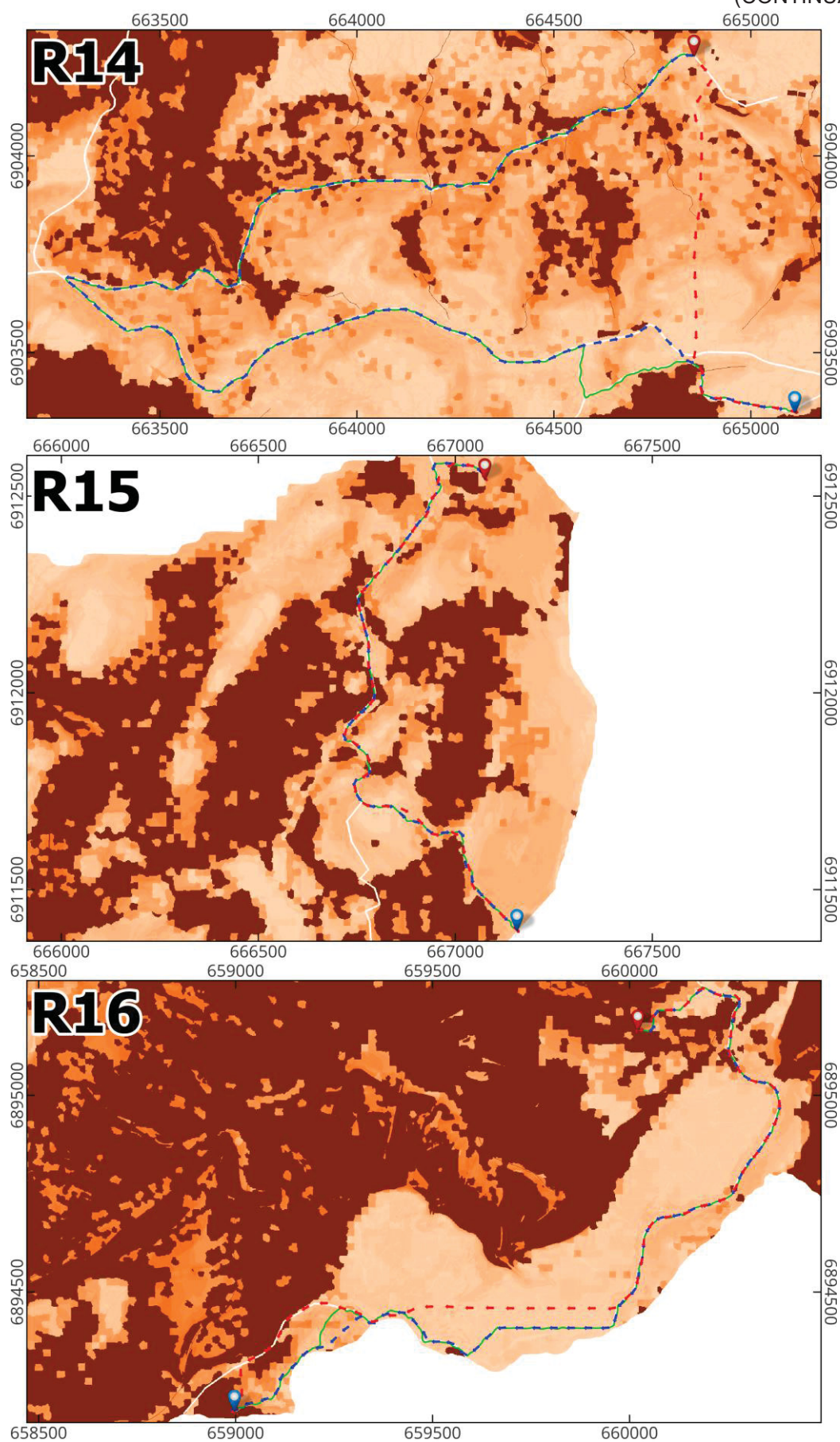
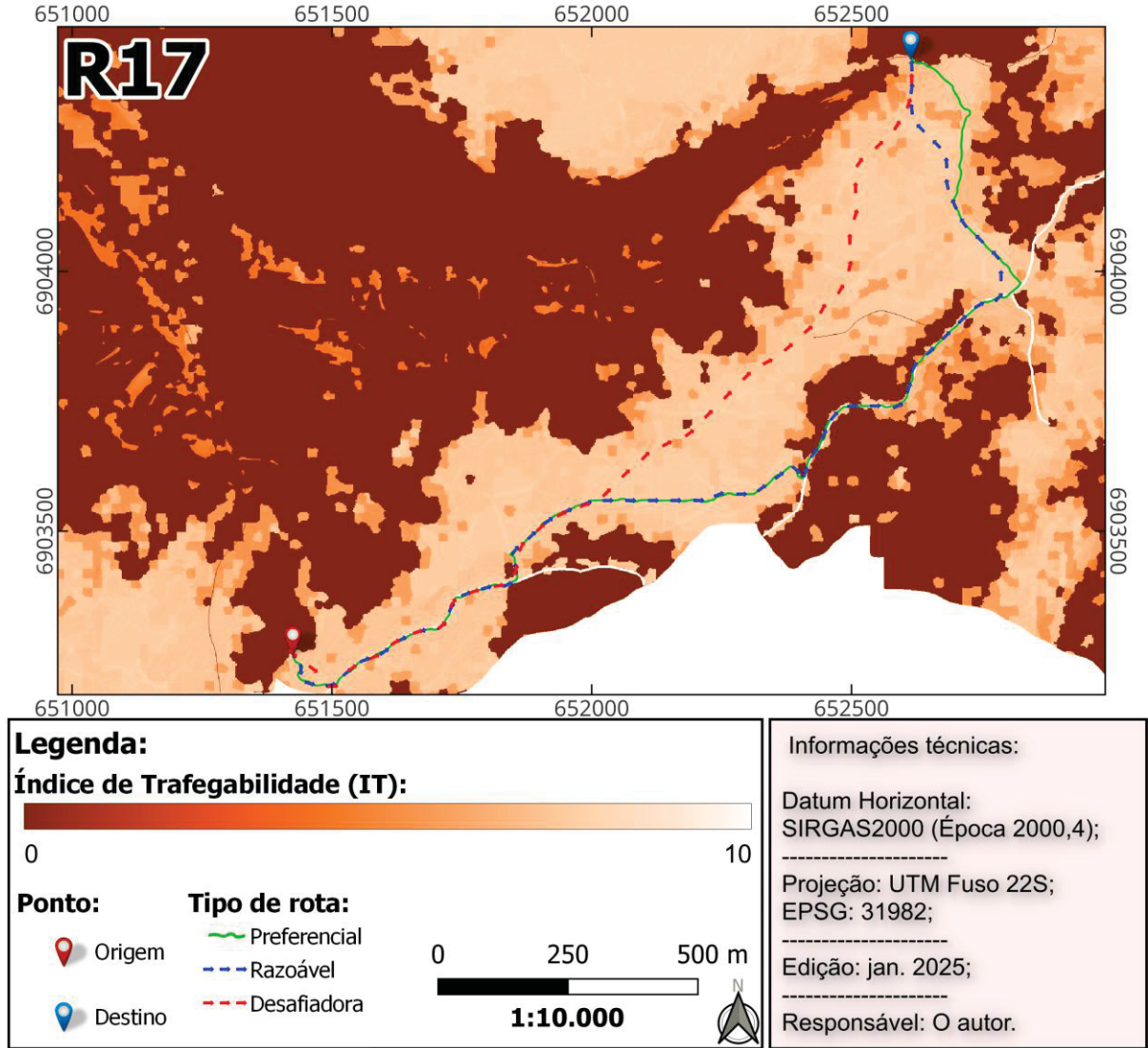


FIGURA 4.8 – ROTAS AUTOMATIZADAS DADO UM PONTO DE ORIGEM E OUTRO DE DESTINO. (CONCLUSÃO)



A TABELA 4.1 permite verificar informações de distâncias de cada uma dessas rotas. A rota preferencial simboliza a opção por uma rota que prioriza a malha viária e o terreno adequado à trafegabilidade. Esse tipo de rota normalmente possui uma maior distância, uma vez que o algoritmo roteador buscará o trajeto mais fácil, em detrimento da maior distância que deverá ser percorrida. Por seu turno, a rota desafiadora, em lado diametralmente oposto, priorizará uma menor distância. Assim, a rota tende a passar por áreas de alta restrição à trafegabilidade de viaturas. No meio termo, tem-se o que se denominou de rota razoável, que busca obter uma combinação ótima de distância e custo de deslocamento. Assim, a rota razoável tende a percorrer uma distância mais curta que a obtida pela rota preferencial, porém mais longa que a obtida pela rota desafiadora.

TABELA 4.1 – DISTÂNCIAS TOTAIS PERCORRIDAS POR TIPO DE ROTA.

POD	Distância cartesiana (m) entre o ponto de origem e o ponto de destino	Distância percorrida (m) por tipo de rota		
		Preferencial	Razoável	Desafiadora
R1	1.292,84	2.334,54	2.233,15	2.218,66
R2	1.813,63	2.900,68	2.636,32	2.521,65
R3	1.559,18	1.913,26	1.896,36	1.879,46
R4	1.419,58	3.550,10	3.550,10	2.510,78
R5	2.032,61	3.011,73	2.976,72	2.691,85
R6	4.231,37	6.269,71	6.204,53	5.692,71
R7	1.687,33	2.802,90	2.802,90	2.342,99
R8	1.944,08	4.807,91	4.705,30	4.606,32
R9	2.350,68	3.140,89	2.904,30	2.637,53
R10	2.330,44	3.150,55	3.138,48	2.909,13
R11	2.047,45	3.803,59	3.470,60	3.466,81
R12	1.677,63	3.658,74	3.530,79	2.289,88
R13	2.633,46	4.315,41	4.135,55	3.307,47
R14	939,08	4.689,61	4.565,28	1.318,16
R15	1.160,96	1.837,22	1.837,22	1.753,93
R16	1.408,59	2.854,81	2.790,83	2.784,11
R17	1.652,01	2.555,44	2.489,05	1.922,92

A TABELA 4.2 traz as distâncias percorridas por rota automatizada para cada uma das classes de restrições à trafegabilidade de viaturas e para a malha viária.

TABELA 4.2 – DISTÂNCIAS PERCORRIDAS NAS CLASSES DE RESTRIÇÕES À TRAFEGABILIDADE E NA MALHA VIÁRIA PELAS ROTAS AUTOMATIZADAS.

(CONTINUA)

POD	Rota	Distância percorrida (m)					
		Classes de restrições à trafegabilidade				Malha viária	
		Muito restritiva	Restritiva	Pouco restritiva	Adequada	Estrada não pavimentada	Estrada pavimentada
R1	preferencial	-	-	3,62	389,89	1.941,03	-
	razoável	-	-	38,62	570,96	1.623,56	-
	desafiadora	-	1,21	67,60	572,17	1.577,69	-
R2	preferencial	7,24	27,76	159,33	166,58	2.539,75	-
	razoável	7,24	25,35	177,44	178,65	2.247,63	-
	desafiadora	21,73	56,73	168,99	152,09	2.122,09	-
R3	preferencial	-	15,69	7,24	548,03	1.342,30	-
	razoável	-	15,69	7,24	554,06	1.319,36	-
	desafiadora	-	18,11	2,40	543,20	1.315,75	-
R4	preferencial	-	1,21	16,90	482,84	3.049,15	-
	razoável	-	1,21	16,90	482,84	3.049,15	-
	desafiadora	-	3,62	115,88	917,40	1.473,88	-
R5	preferencial	-	-	199,17	1.908,43	904,12	-
	razoável	-	-	228,14	1.844,46	904,12	-
	desafiadora	-	70,01	312,64	1.551,13	758,06	-

TABELA 4.2 – DISTÂNCIAS PERCORRIDAS NAS CLASSES DE RESTRIÇÕES À TRAFEGABILIDADE E NA MALHA VIÁRIA PELAS ROTAS AUTOMATIZADAS.

(CONCLUSÃO)

POD	Rota	Distância percorrida (m)					
		Classes de restrições à trafegabilidade				Malha viária	
		Muito restritiva	Restritiva	Pouco restritiva	Adequada	Estrada não pavimentada	Estrada pavimentada
R6	preferencial	-	-	165,37	2.340,58	3.763,76	-
	razoável	-	-	165,37	2.356,27	3.682,88	-
	desafiadora	-	3,62	223,31	2.886,19	2.579,59	-
R7	preferencial	-	2,40	599,93	2.200,56	-	-
	razoável	-	2,40	601,13	2.199,35	-	-
	desafiadora	9,66	123,12	696,50	1.513,71	-	-
R8	preferencial	-	-	22,93	394,72	4.390,25	-
	razoável	-	2,41	24,14	288,50	4.390,25	-
	desafiadora	4,83	159,34	65,18	935,51	3.441,46	-
R9	preferencial	-	60,35	648,22	2.362,31	70,01	-
	razoável	7,24	59,15	604,76	2.163,13	70,01	-
	desafiadora	14,48	210,04	541,99	1.525,78	345,23	-
R10	preferencial	2,41	188,31	304,19	1.454,56	1.201,07	-
	razoável	2,41	188,31	344,02	1.402,66	1.201,07	-
	desafiadora	65,18	165,37	362,13	1.173,31	1.143,13	-
R11	preferencial	18,11	154,51	790,65	1.827,56	1.012,76	-
	razoável	40,70	231,76	727,19	1.467,84	1.003,11	-
	desafiadora	48,28	234,18	713,40	1.467,84	1.003,11	-
R12	preferencial	-	95,36	554,06	1.607,87	1.401,45	-
	razoável	-	176,24	488,88	1.709,26	1.156,41	-
	desafiadora	72,43	330,75	357,30	1.465,43	63,98	-
R13	preferencial	4,83	179,86	342,82	2.744,96	1.042,94	-
	razoável	4,83	189,51	382,65	2.594,07	964,48	-
	desafiadora	10,86	307,81	573,37	2.169,17	246,25	-
R14	preferencial	-	-	-	3,62	4.685,99	-
	razoável	-	-	1,21	18,11	4.545,96	-
	desafiadora	2,41	63,98	435,76	364,55	451,46	-
R15	preferencial	2,41	-	505,78	257,11	1.071,91	-
	razoável	2,41	-	505,78	257,11	1.071,91	-
	desafiadora	2,41	4,83	504,57	217,28	1.024,83	-
R16	preferencial	1,21	228,14	164,17	893,26	1.568,03	-
	razoável	1,21	228,14	195,55	872,74	1.493,19	-
	desafiadora	66,39	178,65	44,66	809,97	1.680,43	-
R17	preferencial	-	-	91,74	1.362,82	1.100,88	-
	razoável	-	-	119,50	1.325,40	1.044,15	-
	desafiadora	-	-	189,51	1.290,39	443,01	-

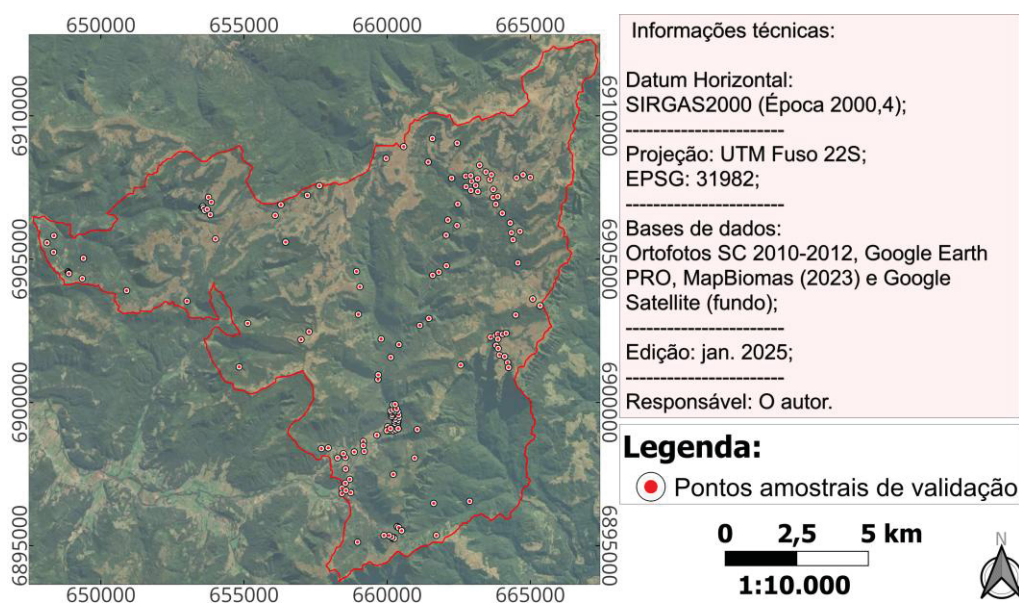
4.4 VALIDAÇÃO

Com a validação, buscou-se determinar a capacidade dos resultados obtidos em representar as restrições à trafegabilidade de viaturas. Conforme Bradbury *et al.* (2018), não se pode provar que a modelagem é a mais correta para todas as condições e aplicações possíveis, mas a validação pode fornecer evidências de sua suficiência aos fins a que se dispõe.

4.4.1 Validação da classificação da camada de uso e cobertura da terra

Dos dados empregados como verdade de campo, foram coletados um total de 180 pontos amostrais de validação (30 para cada uma das classes de uso e cobertura da terra), distribuídos pela área de estudo conforme FIGURA 4.9.

FIGURA 4.9 – PONTOS AMOSTRAIS DE VALIDAÇÃO DO USO E COBERTURA DA TERRA.



Ressalta-se que não foram empregadas as ortofotos SC 2010-2012 para a validação da classe lavoura, tendo em vista o transcurso de mais de 10 anos entre a aquisição dessas ortofotos e os insumos de origem da camada de informação de uso e cobertura da terra – imagens CBERS 04A-WPM do ano de 2024. Para essa classe em específico, foram utilizados os dados coletados do levantamento de campo e imagens do Google *Earth* PRO do biênio 2023-2024. A matriz de confusão obtida para a classificação do uso e cobertura da terra foi apresentada na TABELA 4.3.

TABELA 4.3 – MATRIZ DE CONFUSÃO PARA A CAMADA DE USO E COBERTURA DA TERRA. NA COLUNA, FORAM DISPOSTAS AS CLASSES PREDITAS, E NAS LINHAS, A VERDADE DE CAMPO.

Classes verdade de campo \ Classes previstas (classificador RF)	Vegetação densa	Parque	Vegetação rasteira	Lavoura	Solo exposto	Curso/corpos d' água	Total
Vegetação densa	29	1	0	0	0	0	30
Parque	1	27	2	0	0	0	30
Vegetação rasteira	0	0	28	2	0	0	30
Lavoura	0	0	5	24	1	0	30
Solo exposto	0	0	0	1	29	0	30
Curso/corpos d'água	1	0	0	0	0	29	30
Total	31	28	35	27	30	29	180

Os índices de precisão, *recall*, F1-Score e Kappa condicional por classe podem ser observados na TABELA 4.4. Verifica-se que a classificação gerada pelo algoritmo RF também obteve índices de precisão, *recall* e F1-Score todos iguais ou superiores a 80%. Para a precisão, F1-Score e Kappa condicional, pode-se observar que a lavoura apresentou o pior desempenho com, respectivamente, 80%, 84,21% e 0,76. Para o *recall*, o pior desempenho foi observado na classe vegetação rasteira, com 80%. As classes curso/corpos d'água, vegetação densa e solo exposto obtiveram a melhor precisão (96,67%). Também, a classe curso/corpos d'água obteve o melhor *recall*, F1-Score e Kappa condicional, respectivamente, 100%, 98,31% e 0,97. A exatidão global da classificação foi de 92,22%, com índice Kappa igual a 0,91.

TABELA 4.4 – PRECISÃO, RECALL, F1-SCORE E KAPPA CONDICIONAL ALCANÇADOS PELAS CLASSES DE USO E COBERTURA DA TERRA.

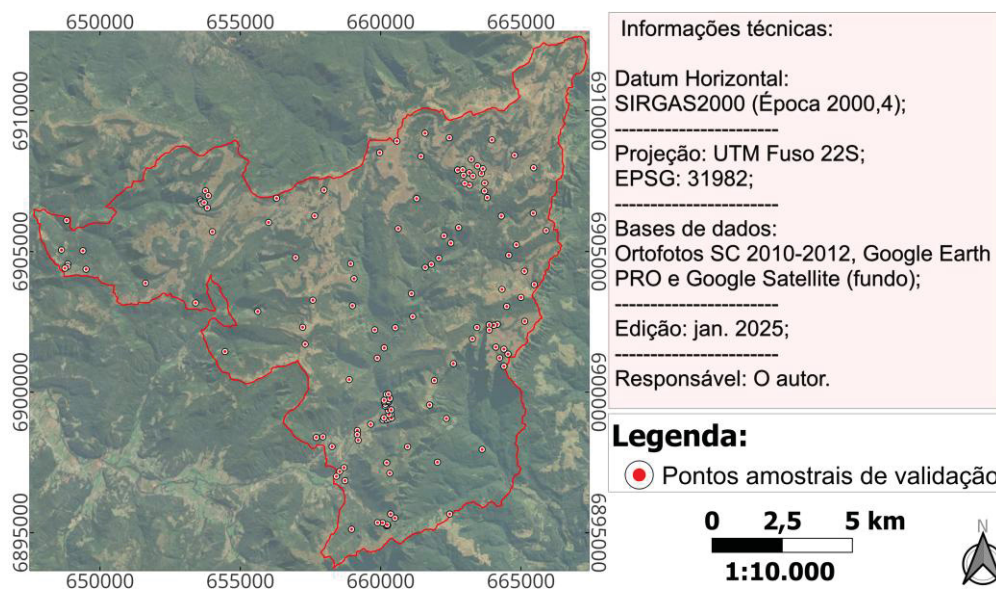
Classe	Precisão (%)	Recall (%)	F1-Score (%)	Kappa condicional
Vegetação densa	96,67	93,55	95,08	0,96
Parque	90	96,43	93,10	0,88
Vegetação rasteira	93,33	80	86,15	0,92
Lavoura	80	88,89	84,21	0,76
Solo exposto	96,67	96,67	96,67	0,96
Curso/corpos d'água	96,67	100	98,31	0,97

4.4.2 Validação do mapa de trafegabilidade de viaturas

Para a validação do mapa de trafegabilidade de viaturas, dos dados empregados como verdade de campo, foram coletados um total de 150 pontos

amostrais (FIGURA 4.10) – 30 amostras para as classes adequada, pouco restritiva, restritiva, muito restritiva e impeditiva –, buscando-se a representatividade em toda a área de estudo e evitando-se os vieses provenientes da subjetividade na seleção dessas amostras.

FIGURA 4.10 – PONTOS AMOSTRAIS DE VALIDAÇÃO PARA O MAPA DE TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS.



A partir dessas amostras, foi realizado o cruzamento entre os pontos amostrais de verdade de campo e seus homólogos preditos pelo modelo e dispostos no mapa de trafegabilidade de viaturas. Esse cruzamento amostral foi exposto na matriz de confusão apresentada na TABELA 4.5.

TABELA 4.5 – MATRIZ DE CONFUSÃO PARA O MAPA DE TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS. NA COLUNA, FORAM DISPOSTAS AS CLASSES PREDITAS, E NAS LINHAS, A VERDADE DE CAMPO.

Classes verdade de campo \ Classes preditas pelo modelo	Classes preditas pelo modelo					Total
	Adequada	Pouco restritiva	Restritiva	Muito restritiva	Impeditiva	
Adequada	28	2	0	0	0	30
Pouco restritiva	4	25	1	0	0	30
Restritiva	0	4	22	4	0	30
Muito restritiva	0	1	2	24	3	30
Impeditiva	0	0	1	1	28	30
Total	32	32	26	29	31	150

Os índices de precisão, *recall*, F1-Score e Kappa condicional por classes do modelo podem ser observados na TABELA 4.6. Verifica-se que as classes adequada e impeditiva alcançaram a melhor precisão (93,33%). Quanto ao *recall*, F1-Score e Kappa condicional, a classe impeditiva alcançou os melhores índices com, respectivamente, 90,32%, 91,8% e 0,92. A análise desses índices para o mapa de trafegabilidade de viaturas revela que as classes adequada e impeditiva apresentaram os melhores desempenhos, o que pode ser explicado pela maior facilidade de distinção entre essas classes: áreas altamente trafegáveis (adequadas) e completamente intransitáveis (impeditivas) tendem a apresentar características bem definidas nos dados de entrada, como declividades muito baixas ou muito altas, presença de corpos d'água e áreas edificadas, que são fatores claramente delimitadores da trafegabilidade.

Por seu turno, a classe restritiva obteve a pior precisão, F1-Score e Kappa condicional com, respectivamente, 73,33%, 78,57% e 0,68, enquanto a classe pouco restritiva obteve o pior *recall* (78,13%). Esse desempenho inferior pode ser atribuído à maior dificuldade na diferenciação entre as classes pouco restritiva, restritiva e muito restritiva, que possuem transições mais graduais e características menos contrastantes. Essa confusão provavelmente decorre da influência de camadas como de tipo de solo e de uso e cobertura da terra, que podem gerar ambiguidades na classificação. Por exemplo, solos com textura intermediária e vegetação rasteira podem ser classificados como pouco restritivos em algumas situações e restritivos em outras, dependendo da umidade, da compactação e da presença de obstáculos menores não captados nos insumos empregados.

TABELA 4.6 – PRECISÃO, *RECALL*, F1-SCORE E KAPPA CONDICIONAL POR CLASSES ALCANÇADOS PARA CADA UMA DAS CLASSES DE RESTRIÇÕES À TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS.

Classe	Precisão (%)	<i>Recall</i> (%)	F1-Score (%)	Kappa condicional
Adequada	93,33	87,50	90,32	0,91
Pouco restritiva	83,33	78,13	80,65	0,79
Restritiva	73,33	84,62	78,57	0,68
Muito restritiva	80	82,76	81,36	0,75
Impeditiva	93,33	90,32	91,80	0,92

A exatidão global e índice Kappa alcançados pelo modelo de elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas foram, respectivamente, de 84,67% e 0,81. Os

resultados apresentados por essas métricas da qualidade permitem inferir um bom desempenho do modelo, não obstante ainda se verifique que há espaços para aprimoramentos.

4.4.3 Validação das rotas

A validação das rotas foi realizada por meio de levantamento de campo, no qual foram verificadas se as rotas automatizadas eram realmente viáveis e factíveis no terreno. Adicionalmente ao levantamento de campo, as rotas automatizadas foram analisadas com emprego de imagens do Google *Earth* Pro e de ortofotos SC 2010-2012. No QUADRO 4.2 foram expostos os resultados da validação qualitativa dessas rotas, em que foram comparadas as rotas preferenciais geradas pelo modelo com os dados disponíveis para validação, buscando-se observar as restrições à trafegabilidade no caminho percorrido.

QUADRO 4.2 – MATRIZ DE VALIDAÇÃO DE ROTAS (ROTA PREFERENCIAL).

(CONTINUA)

POD	Situação real encontrada no terreno	Causa	Possível solução
R1	Passou através de cerca de propriedade particular.	Falta de completeza na vetorização manual da camada de cercas e muros.	Utilização de insumo de maior resolução espacial para a aquisição de cercas e muros.
	Atravessou 180 m em estrada desativada, a cerca de 10 m de nova estrada.	Via desatualizada na camada de malha viária.	Atualização das vias obtidas do OSM por meio de insumos mais atuais.
	Atravessou 4 m pelo leito de cursos d'água sujeitos a efeitos da sazonalidade (podem permitir ou não a trafegabilidade, a depender da época do ano).	Falta de dados sobre a profundidade de cursos d'água em diferentes épocas do ano.	Emprego de insumos que permitam distinguir, em diferentes épocas do ano, a profundidade dos cursos d'água.
	Atravessou 490 m em trilha de largura insuficiente para deslocamento com viaturas.	Falta de distinção entre algumas trilhas e vias para deslocamento de viaturas na camada de malha viária.	Verificação das vias obtidas do OSM por meio de insumos de maior qualidade.
R2	Atravessou 160 m em trilha de largura insuficiente para deslocamento com viaturas.	Falta de distinção entre algumas trilhas e vias para deslocamento de viaturas na camada de malha viária.	Verificação das vias obtidas do OSM por meio de insumos de maior qualidade.
	Percorreu 270 m a mais do que o melhor caminho para atingir o destino.	Via desatualizada na camada de malha viária.	
	Atravessou 11 m pelo leito de cursos d'água sujeitos a efeitos da sazonalidade (podem permitir ou não a trafegabilidade, a depender da época do ano).	Falta de dados sobre a profundidade de cursos d'água em diferentes épocas do ano.	Emprego de insumos que permitam distinguir, em diferentes épocas do ano, a profundidade dos cursos d'água.
	Passou através de cerca de propriedade particular.	Falta de completeza na vetorização manual da camada de cercas e muros.	Utilização de insumo de maior resolução espacial para a aquisição de cercas e muros.
R3	Atravessou 7 m pelo leito de cursos d'água sujeitos a efeitos da sazonalidade (podem permitir ou não a trafegabilidade, a depender da época do ano).	Falta de dados sobre a profundidade de cursos d'água em diferentes épocas do ano.	Emprego de insumos que permitam distinguir, em diferentes épocas do ano, a profundidade dos cursos d'água.
R4	Atravessou 430 m em estrada desativada, a cerca de 150 m de nova estrada construída.	Via desatualizada na camada de malha viária.	Verificação das vias obtidas do OSM por meio de insumos mais atuais.
R5	Passou através de cerca de propriedade particular (2 vezes).	Falta de completeza na vetorização manual da camada de cercas e muros.	Utilização de insumo de maior resolução espacial para a aquisição de cercas e muros.

QUADRO 4.2 – MATRIZ DE VALIDAÇÃO DE ROTAS (ROTA PREFERENCIAL).

(CONTINUAÇÃO)

POD	Situação real encontrada no terreno	Causa	Possível solução
R6	Passou através de cerca de propriedade particular.	Falta de completeza na vetorização manual da camada de cercas e muros.	Utilização de insumo de maior resolução espacial para a aquisição de cercas e muros.
	Atravessou 60 m em área de parque, o que poderia ser evitado ao tráfegar por região vizinha de vegetação rasteira.	Erro na classificação na camada de uso e cobertura da terra: confusão entre classes parque e vegetação rasteira.	Utilização de insumos de maior resolução espectral (superior a quatro bandas) para a classificação supervisionada.
	Percorreu 17 m em área edificada.	Projeção de edificação e malha viária nas mesmas células do mapa de trafegabilidade de viaturas.	Uso de insumos com maior acurácia posicional planimétrica.
	Trafegou 2 m em barranco construído para passagem de estrada, a cerca de 5 m de descida adequada ao deslocamento.	Desnível não captado pelo MDT.	Utilização de insumos de melhor resolução espacial (superior a 1 m) e mais atuais.
R7	Rota sem erros detectados.		
R8	Atravessou 2 m pelo leito de curso d'água sujeito a efeitos da sazonalidade.	Falta de dados sobre a profundidade de cursos d'água em diferentes épocas do ano.	Emprego de insumos que permitam distinguir, em diferentes épocas do ano, a profundidade dos cursos d'água.
	Passou através de cerca de propriedade particular (2 vezes).	Falta de completeza na vetorização manual da camada de cercas e muros.	Utilização de insumo de maior resolução espacial para a aquisição de cercas e muros.
	Atravessou 430 m em estrada desativada, a cerca de 150 m de nova estrada construída.	Via desatualizada na camada de malha viária.	Verificação das vias obtidas do OSM por meio de insumos mais atuais.
R9	Rota sem erros detectados.		
R10	Passou através de cerca de propriedade particular.	Falta de completeza na vetorização manual da camada de cercas e muros.	Utilização de insumo de maior resolução espacial para a aquisição de cercas e muros.
R11	Passou através de cerca de propriedade particular.	Falta de completeza na vetorização manual da camada de cercas e muros.	Utilização de insumo de maior resolução espacial para a aquisição de cercas e muros.
	Atravessou 400 m em trilha de largura insuficiente para o deslocamento com viaturas.	Falta de distinção entre algumas trilhas e vias para deslocamento de viaturas na camada de malha viária.	Verificação das vias obtidas do OSM por meio de insumos de maior qualidade.
	Atravessou uma valeta de 2 m de largura.	Desnível não captado pelo MDT.	Utilização de insumos de melhor resolução espacial (superior a 1 m) e mais atuais.

QUADRO 4.2 – MATRIZ DE VALIDAÇÃO DE ROTAS (ROTA PREFERENCIAL).
(CONCLUSÃO)

POD	Situação real encontrada no terreno	Causa	Possível solução
R12	Atravessou 2 m pelo leito de curso d'água sujeito a efeitos da sazonalidade (pode permitir ou não a trafegabilidade, a depender da época do ano).	Falta de dados sobre a profundidade de cursos d'água em diferentes épocas do ano.	Emprego de insumos que permitam distinguir, em diferentes épocas do ano, a profundidade dos cursos d'água.
	Atravessou 9 m em região alagada, ao lado de área de vegetação rasteira (adequada ao deslocamento).	Região não classificada na camada de uso e cobertura da terra.	Utilização de insumos de maior resolução espectral (superior a quatro bandas) para a classificação supervisionada.
R13	Atravessou 3 m pelo leito de curso d'água sujeito a efeitos da sazonalidade (pode permitir ou não a trafegabilidade, a depender da época do ano).	Falta de dados sobre a profundidade de cursos d'água em diferentes épocas do ano.	Emprego de insumos que permitam distinguir, em diferentes épocas do ano, a profundidade dos cursos d'água.
	Passou através de cerca de propriedade particular.	Falta de completeza na vetorização manual da camada de cercas e muros.	Utilização de insumo de maior resolução espacial para a aquisição de cercas e muros.
R14	Atravessou 760 m em trilha de largura insuficiente para o deslocamento com viaturas.	Falta de distinção entre algumas trilhas e vias para deslocamento de viaturas na camada de malha viária.	Verificação das vias obtidas do OSM por meio de insumos de maior qualidade.
R15	Atravessou 8 m pelo leito de cursos d'água sujeitos a efeitos da sazonalidade (podem permitir ou não a trafegabilidade, a depender da época do ano).	Falta de dados sobre a profundidade de cursos d'água em diferentes épocas do ano.	Emprego de insumos que permitam distinguir, em diferentes épocas do ano, a profundidade dos cursos d'água.
	Atravessou 80 m em trilha de largura insuficiente para o deslocamento com viaturas, circundada por vegetação densa.	Falta de distinção entre algumas trilhas e vias para deslocamento de viaturas na camada de malha viária.	Verificação das vias obtidas do OSM por meio de insumos de maior qualidade.
R16	Rota sem erros detectados.		
R17	Passou através de cerca de propriedade particular.	Falta de completeza na vetorização manual da camada de cercas e muros.	Utilização de insumo de maior resolução espacial para a aquisição de cercas e muros.

A precisão (Eq. (12)) das rotas preferenciais obtida para cada um dos PODs foi exposta na TABELA 4.7. Por seu turno, a precisão média foi igual a 94,17%, o que demonstra um desempenho satisfatório do modelo de automação de rotas. Esse resultado indica que as rotas preferenciais, no geral, possuem alta assertividade quanto à possibilidade de deslocamento de viaturas. Não obstante, ressalta-se que

outras rotas são possíveis, como a razoável e a desafiadora, sendo a melhor rota dependente dos critérios do usuário. Esses critérios podem ser, por exemplo, baseados em preferências por menores ou maiores distâncias a serem percorridas conjugadas com a maior ou menor dificuldade (custo) da trafegabilidade de viaturas.

TABELA 4.7 – PRECISÃO DA ROTA PREFERENCIAL.

POD	Precisão (%)	Precisão média (%)
R1	71,09	94,17
R2	84,76	
R3	99,63	
R4	87,89	
R5	99,93	
R6	98,72	
R7	100	
R8	90,97	
R9	100	
R10	99,96	
R11	89,40	
R12	99,70	
R13	99,91	
R14	83,79	
R15	95,21	
R16	100	
R17	99,96	

Por fim, foram comparadas duas rotas automatizadas pelo modelo com os respectivos rastreios realizados em campo. Na FIGURA 4.11A observa-se que as rotas comparadas tiveram um distanciamento máximo de 9 m (rota A), enquanto as rotas da FIGURA 4.11B tiveram um distanciamento máximo de 21 m (rota B). Nessas rotas, os RMSEs – calculados pelas Eq. (13) e Eq. (14) com uso de 20 Pares de Pontos Amostrais (PPAs, APÊNDICE 3) sistematicamente distribuídos por toda a extensão das rotas – foram iguais a 4,36 m (rota A) e 4,95 m (rota B) (TABELA 4.8). Por conseguinte, verifica-se uma boa consistência entre a rota percorrida em campo e a rota automatizada pelo modelo.

FIGURA 4.11 – COMPARATIVO ENTRE ROTAS RASTREADAS EM CAMPO E ROTAS GERADAS PELO MODELO DE AUTOMAÇÃO DE ROTAS (ROTA PREFERENCIAL).

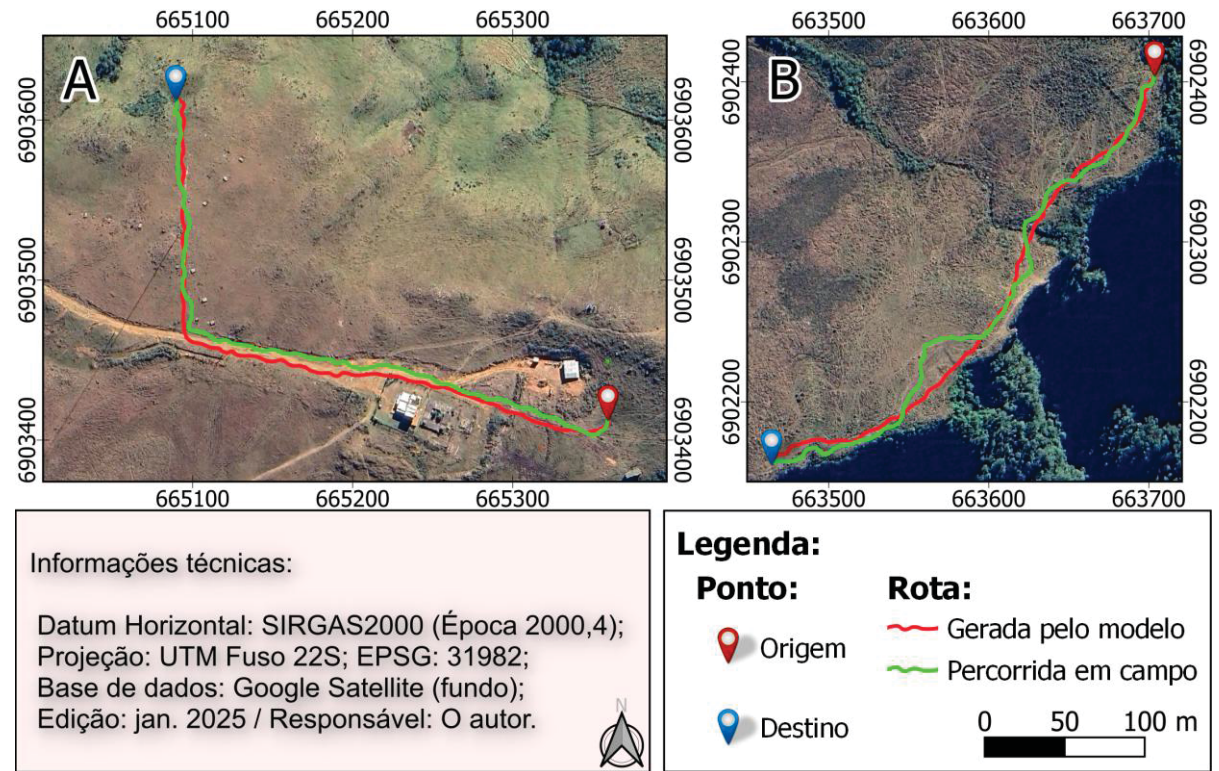


TABELA 4.8 – ERRO POSICIONAL PLANIMÉTRICO ENTRE AS ROTAS AUTOMATIZADAS E AS ROTAS HOMÓLOGAS PERCORRIDAS EM CAMPO.

Par de Pontos Amostrais	Erro posicional planimétrico (m) Rota A	Erro posicional planimétrico (m) Rota B
PPA ₁	1,07	3,18
PPA ₂	5,06	2,27
PPA ₃	5,08	1,98
PPA ₄	2,76	3,72
PPA ₅	2,90	1,80
PPA ₆	3,99	3,19
PPA ₇	5,66	1,88
PPA ₈	3,49	0,78
PPA ₉	7,95	5,37
PPA ₁₀	6,79	1,02
PPA ₁₁	6,50	0,55
PPA ₁₂	5,70	2,22
PPA ₁₃	6,13	10,44
PPA ₁₄	2,34	11,48
PPA ₁₅	0,58	6,63
PPA ₁₆	0,87	3,36
PPA ₁₇	3,23	3,40
PPA ₁₈	0,39	2,21
PPA ₁₉	2,74	5,27
PPA ₂₀	2,43	7,98

4.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam a viabilidade do método em classificar áreas de restrições à trafegabilidade de viaturas. Com a integração de técnicas de PDI, insumos de SR, Aprendizado de Máquina e MCDA, o método proposto produziu resultados satisfatórios que podem contribuir para o avanço na elaboração dos mapas de trafegabilidade de viaturas e na automação de rotas, bem como de outros produtos cartográficos temáticos correlatos. A MCDA pelo AHP permitiu a estruturação e hierarquização das camadas de informação e dados não espacializados. Por seu turno, o *Dinamica* EGO possibilitou o desenvolvimento de modelos capazes de auxiliar o planejamento e a tomada de decisão e sua flexibilidade como plataforma de modelagem mostra-se vantajosa ao permitir a integração de novas variáveis e ajustes conforme as necessidades dos usuários.

Um ponto que deve ser enfatizado é a lacuna metodológica de MCDA aplicada na elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas, pelos poucos trabalhos publicados sobre a temática e pelas incertezas inerentes à trafegabilidade. Neste estudo, a MCDA foi operacionalizada pelo AHP e sua aplicação tornou-se particularmente valiosa ao lidar com muitas variáveis modeladores do fenômeno. A determinação dos pesos relativos foi um dos pontos críticos observados no AHP, uma vez que pode afetar significativamente o mapa de trafegabilidade de viaturas e, conseqüentemente, a automação de rotas.

Adicionalmente, os resultados destacam o papel da subjetividade no AHP. Os julgamentos feitos durante a comparação por pares foram baseados na experiência, conhecimentos de campo e com base na literatura revisada. O exame de consistência indicou um RC de 4,9%, valor abaixo do limite de 10%, demonstrando a coerência dos julgamentos realizados. No entanto, é importante reconhecer que a complexidade inerente à interação entre o terreno, a viatura e o motorista pode introduzir incertezas na modelagem, sendo recomendável a incorporação de opiniões de múltiplos especialistas – o que fugiu ao escopo deste estudo – e refinamentos no processo de atribuição de pesos – que foram realizados por meio de iterações no AHP.

A depender das necessidades do usuário do mapa de trafegabilidade de viaturas, há a possibilidade de conversão do mapa em sua forma contínua de ITs (produto da MCDA) para a categórica, com a atribuição de classes de restrições à trafegabilidade aos intervalos de valores. Neste estudo, a definição de intervalos para

as classes foi realizada por meio do algoritmo de Quebras Naturais de Jenks, que se mostrou particularmente útil por permitir apresentar o mapa de trafegabilidade de viaturas em cinco classes de restrições à trafegabilidade – adequada, pouco restritiva, restritiva, muito restritiva e impeditiva.

Um aspecto fundamental identificado na modelagem foi a influência dos insumos na qualidade do mapa de trafegabilidade de viaturas. O MDT SC 2010-2012, com resolução espacial de 1 m, mostrou-se adequado para a geração das camadas de declividade, TWI e TRI, proporcionando uma representação detalhada do relevo. Da mesma forma, as imagens CBERS 04A-WPM, com resolução espacial de 2 m, foram eficazes na extração de classes de uso e cobertura da terra. Por sua vez, os dados do OSM possibilitaram obter vias de tráfego vetorizadas. No entanto, esses dados apresentaram inconsistências na diferenciação entre trilhas e estradas, o que levou algumas rotas automatizadas a percorrerem parte do caminho por vias não propícias à trafegabilidade de viaturas.

Por seu turno, os insumos de tipo de solo estavam em formato vetorial, em escala 1:250.000, tendo sido transformados em formato *raster* e reamostrados para a resolução espacial de 1 m. A alta generalização desses insumos constituiu-se em uma fonte de incerteza considerável para o modelo, o que foi mitigado pela aplicação da Lógica *Fuzzy* nas zonas de transição entre os diferentes tipos de solo. Por outro lado, as manchas de solo não foram tratadas – constituindo-se em uma limitação à modelagem – uma vez que para isso seriam necessários insumos de melhor qualidade (não disponíveis) ou levantamentos de campo para coleta de amostras de solo (o que fugiu ao escopo deste estudo).

Os insumos de condições meteorológicas obtidos do *WorldClim*, geradores das camadas de informação de temperatura e precipitação, são resultados de interpolação em nível global e de uma série histórica de 1970 a 2000, sendo fontes de incertezas importantes no modelo. A série histórica é uma estimativa para a temperatura e precipitação esperada para um determinado período. No entanto, essa série pode não traduzir os reais acontecimentos do período em que será realizado o deslocamento, uma vez que diz respeito a fatores altamente dinâmicos, de difícil previsão. Também, fatores como aquecimento global e mudanças climáticas, com efeitos adversos sobre a temperatura e precipitação de diversas partes do mundo, podem afetar as predições realizadas por meio dessa série histórica de mais de duas

décadas atrás. Assim, maiores investigações necessitam ser feitas sobre a validade dos insumos do *WorldClim* para a previsão de precipitação e temperatura.

Uma alternativa possível para evitar as incertezas advindos dos insumos do sistema *WorldClim* é a utilização de dados de condições meteorológicas mais atuais. Para tanto, foram utilizados, em complemento aos insumos do *WorldClim*, dados de temperatura e precipitação de série histórica de 2014 a 2024, obtidos da estação meteorológica INMET A845 (Bom Jardim da Serra). Dessa estação, também foram obtidos dados para a velocidade média do vento e umidade relativa do ar, que foram utilizados com a premissa de que auxiliam na secagem do solo úmido por evaporação, melhorando a trafegabilidade.

A inclusão das condições meteorológicas – precipitação, temperatura, umidade relativa do ar e velocidade média do vento – marcam avanços significativos na análise da trafegabilidade sob o viés da influência de fatores altamente dinâmicos. Não obstante, ainda são necessárias maiores investigações da correlação entre elas e o fenômeno analisado.

O mapa de trafegabilidade de viaturas classificado em classes de restrição à trafegabilidade (adequada a impeditiva) obteve uma exatidão global de 84,67%, com índice Kappa de 0,81, indicando um desempenho satisfatório do modelo. A validação das rotas automatizadas pelo modelo também reforça sua aplicabilidade: a comparação entre duas rotas automatizadas e os trajetos homólogos percorridos em campo revelaram RMSEs iguais a 4,36 m e 4,95 m. Também, na verificação da precisão de 17 rotas automatizadas pelo modelo, foi obtida uma precisão média de 94,17% (rota preferencial). Por seu turno, a análise qualitativa indicou que a maior parte das inconsistências estava associada a limitações nos insumos empregados na obtenção das camadas de entrada da MCDA, o que reforça a necessidade de insumos de melhor qualidade para a modelagem da trafegabilidade de viaturas.

Os achados deste estudo reforçam o potencial dos modelos desenvolvidos para aplicações em diversos cenários de trafegabilidade, permitindo sua adaptação para diferentes tipos de viaturas e condições ambientais. No entanto, destaca-se a necessidade de aprimoramentos, especialmente na obtenção de insumos mais detalhados e na inclusão de fatores dinâmicos de curto prazo. Também, a informação limitada sobre as características específicas da viatura que será utilizada e sobre as habilidades do motorista apresentam um desafio significativo na determinação da

trafegabilidade, uma vez que a interação da tríade terreno-viatura-motorista exerce grande influência na trafegabilidade de viaturas.

Nesse contexto, a ausência da modelagem dos elementos descritos na Subseção 3.2.9 (limitações da modelagem) pode prejudicar a aplicação segura dos modelos, sendo necessário um trabalho multidisciplinar para a incorporação de todas as variáveis influentes no fenômeno. Por conseguinte, os modelos desenvolvidos, ainda que tragam resultados promissores, podem ser refinados para uma aplicação com viés prático e específico.

Em comparação com estudos correlatos, os autores He *et al.* (2023) utilizaram um conjunto de dados com resolução espacial de 9,55 m para a obtenção das camadas de declividade, TWI e uso e cobertura da terra. Neste estudo, foram considerados dados para a declividade e TWI de 1 m de resolução espacial e para o uso e cobertura da terra com 2 m de resolução espacial (reamostrados para 1 m). Além das camadas comuns apresentadas neste estudo e em He *et al.* (2023), esses autores consideraram na MCDA a altitude, rocha e solo, junta e estrutura, riscos geológicos, Índice de Posição Topográfica (*Topographic Position Index*), Índice de Potência de Fluxo (*Stream Power Index*) e Índice de Cone (*Rating Cone Index*). Neste estudo, diferentemente de He *et al.* (2023), foram modelados o TRI, a precipitação, a temperatura, a umidade relativa do ar, a velocidade média do vento, a malha viária e o tipo de rodado.

O AHP foi empregado por He *et al.* (2023) para determinar o peso de cada variável influenciadora na trafegabilidade, tendo obtido um RC igual a 7,7% (maior que o RC obtido neste estudo, igual a 4,9%). He *et al.* (2023) adotaram no método a obrigatoriedade de atribuição de posto de um a nove para todas as classes (Escala Fundamental de Saaty (1990)), inclusive para as classes que, por si só, fazem uma célula ser adequada ou impeditiva, o que se mostra de baixa razoabilidade sob um viés prático. Por outro lado, neste estudo, foi adotada uma abordagem híbrida na atribuição de postos, em que algumas classes foram designadas categoricamente como adequadas (estradas) ou impeditivas ($TRI \geq 6$, declividade $\geq 40^\circ$, vegetação densa, lavoura, curso/corpos d'água, edificações e cercas e muros), sendo as demais classes classificadas conforme a Escala Fundamental de Saaty (1990). Dessa forma, com a utilização de uma abordagem híbrida, foi possível obter um mapa de trafegabilidade de viaturas com melhor compromisso com a realidade de campo.

Por sua vez, Khan, Kashif e Shah (2021) fizeram uso de imagens Sentinel 2, com 10 m de resolução espacial, para a obtenção do uso e cobertura da terra, o qual teve suas classes de interesse para a trafegabilidade extraídas por classificação manual. Do MDT do ALOS PALSAR, com 12,5 m de resolução espacial, foram extraídas as camadas de TRI, TWI e declividade. Para a obtenção do tipo de solo, foi utilizado um mapa de reconhecimento de solos em escala 1:200.000. Assim, a MCDA desses autores, para a obtenção do mapa de trafegabilidade de viaturas, se restringiu a um total de cinco camadas de informação de entrada no AHP. Ressalta-se que todas essas camadas foram modeladas neste estudo, com diferencial da modelagem das condições meteorológicas – precipitação, temperatura, umidade relativa do ar e velocidade média do vento –, malha viária e edificações, tipo de rodado e cercas e muros.

Por seu turno, os resultados apresentados por Potic *et al.* (2024) fornecem um referencial importante para comparar os métodos e critérios adotados neste estudo. Ambos os trabalhos utilizaram a MCDA para a modelagem da trafegabilidade, mas com diferenças significativas em relação à estruturação das camadas, à resolução espacial dos dados e à atribuição dos valores de IT. Uma vantagem do presente estudo em relação ao de Potic *et al.* (2024) está na resolução espacial mais detalhada das camadas. Enquanto Potic *et al.* (2024) utilizaram dados do CLC (100 m) e modelos de elevação interpolados a 30 m, neste estudo foram empregados insumos com resolução espacial mais refinada, como um MDT com 1 m de resolução espacial para o cálculo do TRI, permitindo uma melhor caracterização da rugosidade do terreno. Isso confere maior precisão na modelagem da trafegabilidade, especialmente em terrenos com variações abruptas.

Por outro lado, uma diferença metodológica importante está na atribuição de IT para vias pavimentadas e não pavimentadas. Neste estudo, considerou-se que vias não pavimentadas oferecem 95% da trafegabilidade das vias pavimentadas, enquanto Potic *et al.* (2024) adotaram um valor mais restritivo, assumindo 80%. A abordagem adotada neste estudo reflete a realidade de viaturas comuns de mercado com características de emprego em ambientes fora de estrada, que ainda conseguem operar eficientemente em vias não pavimentadas, especialmente em condições meteorológicas favoráveis. No entanto, a atribuição de 80% por Potic *et al.* (2024) pode ser mais adequada para aplicações que envolvam viaturas com menor capacidade fora de estrada, como as de tração 4x2.

Também, observou-se uma diferença metodológica fundamental entre os estudos quanto a técnica utilizada na integração das camadas. Potic *et al.* (2024) empregaram a Análise de Sobreposição Ponderada (*Weighted Overlay Analysis* – WOA), enquanto este estudo utilizou o AHP. A WOA atribui pesos fixos às camadas e integra os valores por meio de uma soma ponderada simples. Essa abordagem é computacionalmente eficiente e permite uma modelagem rápida, mas não incorpora comparações diretas entre os critérios. Por outro lado, o AHP permite que os pesos das camadas sejam definidos com base em comparações aos pares, resultando em uma estrutura de decisão mais detalhada, na qual a importância relativa de cada camada é melhor justificada e validada pela Razão de Consistência (RC). Dessa forma, o uso do AHP neste estudo representa uma vantagem metodológica, pois possibilita um processo de decisão mais estruturado e transparente, reduzindo a subjetividade na atribuição dos pesos das camadas.

Em suma, os estudos de He *et al.* (2023), Khan, Kashif e Shah (2021) e Potic *et al.* (2024), embora explorem ideias semelhantes, adotaram abordagens diferentes e mais restritivas em comparação com este estudo, que forneceu um contexto mais amplo com o desenvolvimento de modelos para a elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas e para a automação de rotas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

O presente estudo atingiu seus objetivos (geral e específicos) ao desenvolver e validar um método para a elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas e automação de rotas. O objetivo geral foi alcançado por meio da implementação de dois modelos no *Dinamica* EGO, com a integração de variáveis influenciadoras da trafegabilidade – 10 camadas de informação e três dados não espacializados – com uso de MCDA pelo AHP e automação de rotas utilizando o algoritmo de Dijkstra. Os objetivos específicos foram cumpridos com a identificação das variáveis influentes na trafegabilidade, aplicação de algoritmos de segmentação e classificação para a extração de classes relevantes, integração das variáveis para a elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas, automação de rotas e validação dos resultados.

Os modelos foram informados pelas características da flexibilidade, podendo receber novas entradas e diferentes tipos de dados, espacializados ou não espacializados; adaptabilidade, uma vez que pode ser ajustado conforme necessidade dos usuários; simplicidade, economicidade e replicabilidade, com a utilização de SIGs e de plataforma de modelagem gratuita, evitando-se a implementação de códigos fechados, que gerem obscuridade nos resultados; e generalidade, com possibilidade de utilização dos modelos em outras áreas de interesse.

O desenvolvimento de modelos que possam avaliar a trafegabilidade mostra-se de grande importância para o planejamento e tomada de decisão em órgãos e entidades públicos ou privados e um avanço significativo nos estudos sobre a temática. No contexto do Brasil, país de dimensões continentais e de grandes áreas rurais, citam-se como principais usuários desses modelos na área governamental o IBGE, IBAMA, Embrapa e demais empresas públicas de pesquisa agropecuária e assistência técnica agrosanitária, serviços de emergência, Forças Armadas e demais forças de segurança pública. Na área privada, visualizam-se como principais usuários os agropecuaristas, empresas de energia e de construção civil, turismo de natureza (ecoturismo) e grupos de lazer ou esporte, entre os quais se incluem os jipeiros.

Para trabalhos futuros, recomenda-se que sejam realizados testes dos modelos desenvolvidos em outras áreas de interesse, para fins de comparação dos resultados obtidos. Sugere-se também que os mapas de trafegabilidade de viaturas elaborados e as rotas automatizadas sejam testados quanto à usabilidade juntos aos

usuários previstos para esses tipos de produtos cartográficos. Assim, pode-se avaliar os impactos (*outcomes*), como o grau de satisfação ou as modificações na realidade dos usuários.

Futuras pesquisas podem se concentrar na otimização dos modelos com a inclusão de novas variáveis ligadas à viatura, que afetem diretamente a interação terreno-viatura. Além disso, a análise e a elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas para diferentes meses ou épocas do ano, com foco nos efeitos temporais e nas variações sazonais devido à influência de variáveis dinâmicas, podem ajudar a compreender com maior profundidade o fenômeno da trafegabilidade.

Também, o desenvolvimento de interface *web* para hospedagem dos mapas são colocadas como possibilidades futuras, com funcionalidades que permitam aos usuários inserirem variáveis dinâmicas em tempo real e escolherem a viatura que será utilizada no deslocamento. Nesse contexto, podem ser criados aplicativos *mobile* ou *web* de automação de rotas entre dois pontos para mapas de trafegabilidade dinâmicos. Soluções de realidade aumentada, para integração desses mapas e rotas com a superfície real do terreno podem ser consideradas. Pode-se ainda seguir para uma linha de automação com emprego de IA e visão computacional, em que as viaturas possam se deslocar de modo autônomo.

Com base nos aprendizados obtidos nesta pesquisa, orienta-se ainda melhores práticas a serem adotadas nos trabalhos futuros sobre a temática: conduzir uma ampla pesquisa em repositórios digitais dos insumos disponíveis para compor as camadas de informação, preferindo-se, em regra, os de maior qualidade; utilização de IA, mais especificamente de algoritmos classificadores com aplicação no Aprendizado de Máquina, para a extração de feições de interesse para a trafegabilidade, em especial daquelas que não puderem ser obtidas diretamente de insumos disponíveis; utilização de GEOBIA para imagens de alta resolução espacial, como CBERS 04A-WPM; e uso de escalas grandes (1:10.000 e superiores), visando à elaboração de mapas e geração de rotas que tenham utilidade prática em nível operacional, para que se possa atender conjuntamente não só as necessidades dos tomadores de decisão, mas também dos motoristas e equipes das viaturas.

REFERÊNCIAS

AB'SÁBER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. 3. ed. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.

ACHANTA, R.; SHAJI, A.; SMITH, K.; LUCCHI, A.; FUA, P.; SÜSTRUNK, S. SLIC Superpixels Compared to State-of-the-Art Superpixel Methods. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 34, n. 11, p. 2274-2282, 2012. DOI. 10.1109/TPAMI.2012.120.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Bacias Hidrográficas Ottocodificadas (Níveis Otto 1-7)**. 2022. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/b228d007-6d68-46e5-b30d-a1e191b2b21f>. Acesso em: 25 jul. 2024.

AHMED, I.; DAS, N.; DEBNATH, J.; BHOWMIK, M.; BHATTACHARJEE, S. Flood hazard zonation using GIS-based multi-parametric Analytical Hierarchy Process. **Geosystems and Geoenvironment**, v. 3, n. 2, 2024. DOI. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2023.100250>.

AIGBOKHAN, O. J.; PELEMO, O. J.; OGOLIEGBUNE, O. M.; ESSIEN, N. E.; EKUNDAYO, A. A.; ADAMU, S. I. Comparing Machine Learning Algorithms in Land Use Land Cover Classification of Landsat 8 (OLI) Imagery. **Asian Res. J. Math**, [S. l.], v. 18, n. 3, p. 62-74, 2022. DOI. 10.9734/arjom/2022/v18i330367.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI. 10.1127/0941-2948/2013/0507.

ALVES, A.; MARCELINO, F.; GOMES, E.; ROCHA, J.; CAETANO, M. Spatiotemporal Land-Use Dynamics in Continental Portugal 1995–2018. **Sustainability**, [S. l.], v. 14, n. 23, 2022. DOI. 10.3390/su142315540.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6502: Rochas e solos**. Rio de Janeiro: ABNT, 1995. 18 p. Disponível em: https://engenhariacivilfsp.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/02/abnt_nbr_06502_-_1995_-_rochas_e_solos_-_terminologia.pdf. Acesso em: 10 nov. 2024.

BAHIA. Infraestrutura de Dados Espaciais do Estado da Bahia. **Geoportal IDE Bahia**. 2025. Disponível em: <https://geoportal.ide.ba.gov.br/>. Acesso em: 10 jan. 2025.

BASU, R.; FENTON, O.; DALY, E.; TUOHY, P. Identifying favourable conditions for farm scale trafficability and grass growth using a combined Sentinel-2 and soil moisture deficit approach. **Frontiers in Environmental Science**, v. 12, 2024. DOI. 10.3389/fenvs.2024.1331659.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin**, [S. l.], v. 24, p. 43-69, 1979. DOI. <http://dx.doi.org/10.1080/02626667909491834>.

BHAVANA, D.; LIKHITA, N.; MADHUMITHA, G. V.; RATNAM, D. V. Machine learning based object-level crop classification of PlanetScope data at South India Basin. **Earth Sci Inform**, v. 16, p. 91-104, 2023. DOI. 10.1007/s12145-022-00922-4.

BOITAT, I. J.; WANIA, A.; DALMASSO, S. **Manual for CEMS-Rapid Mapping Products**. JRC Technical Report, [S. l.], European Commission, Copernicus, 2020. 92 p. Disponível em: <https://emergency.copernicus.eu/mapping/ems/manual-cems-rapid-mapping-products>. Acesso em: 5 out. 2023.

BRADBURY, M.; DASCH, J.; GONZALEZ-SANCHEZ, R.; HODGES, H.; IAGNEMMA, K.; JAIN, A.; JAYAKUMAR, P.; LETHERWOOD, M.; MCCULLOUGH, M.; PRIDDY, J.; WOJTYSIAK, B. **Next-Generation NATO Reference Mobility Model (NRMM) Development**. Technical report. NATO Science and Technology Organization: Neuilly-Sur-Seine, France, 2018. 250 p. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1047407.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2024.

BRASIL. Ministério da Defesa. Exército Brasileiro. **Diretriz de Trafegabilidade para Viaturas sobre Rodas e sobre Lagartas**. Separata ao BE N° 1/2011. Brasília, 2011. Disponível em: http://www.sgex.eb.mil.br/sistemas/boletim_do_exercito/copiar.php?codarquivo=68&act=sep. Acesso em: 24 mar. 2024.

BRASIL. Ministério da Defesa. Exército Brasileiro. **Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG)**. EB80-N-72.004. Brasília, 2016a. Disponível em: <https://geoportal.eb.mil.br/portal/images/Documentos/2024/ETCQDG.pdf>. Acesso em: 29 jan. 2025.

BRASIL. Ministério da Defesa. Exército Brasileiro. **Especificação Técnica para Produtos de Conjunto de Dados Geoespaciais (ET-PCDG)**. EB80-N-72.001. Brasília, 2. ed., 2016b. Disponível em: https://geoportal.eb.mil.br/portal/images/Documentos/2024/ET_PCDG_2016_2aEdicao_Aprovada_Publicada_BE_7_16.pdf. Acesso em: 26 fev. 2025.

BREIMAN, L. Bagging predictors. **Machine Learning**, v. 24, n. 2, p. 123-140, 1996. DOI. <https://doi.org/10.1007/BF00058655>.

BREIMAN, L. Random Forests. **Machine Learning**, [S. l.], v. 45, p. 5-32, 2001. DOI. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.

BREIMAN, L.; FRIEDMAN, J.; STONE, C. J.; OLSHEN, R. A. Classification and regression trees. **CRC press**, 1984. DOI. <https://doi.org/10.1201/9781315139470>.

CENTRO DE ESTUDOS DA METRÓPOLE (CEM). Universidade de São Paulo. USP. **Base cartográfica digital em formato shapefile das zonas climáticas conforme classificação Koppen**. 2021. DOI. 10.55881/CEM.db.clk001.

CHANG, K. T. **Introduction to geographic information systems**. 4. ed. Nova York: McGraw-Hill Education, 2018. Disponível em: https://www.academia.edu/28691712/Introduction_to_GIS_Kang_Tsung_Chang_pdf. Acesso em: 22 jun. 2024.

CHEN, D.; XU, Y.; SONG, Y.; XIN, M.; WU, L.; KONG, A.; WANG, H.; DAI, P.; YU, H. A Bionic Walking Wheel for Enhanced Trafficability in Paddy Fields with Muddy Soil. **Biomimetics**, v. 9, n. 2, 2024. DOI. <https://doi.org/10.3390/biomimetics9020068>.

CHICCO, D.; JURMAN, G. The advantages of the Matthews correlation coefficient (MCC) over F1 score and accuracy in binary classification evaluation. **BMC Genomics**, v. 21, n. 6, 2020. DOI. <https://doi.org/10.1186/s12864-019-6413-7>.

CONGALTON, R.; GREEN, K. **Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices**. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis, 2009. 183 p.

CONTINENTAL. **Tipos de pneus para veículos**. 2024. Disponível em: <https://www.conti.com.br/>. Acesso em: 03 jun. 2024.

CONVERTINO, F.; VOX, G.; BLANCO, I.; HACHEM, A.; SCHETTINI, E. Plastic waste management in agriculture through a GIS-based territory design approach. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 217, 2025. DOI. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108210>.

CORDEIRO, W. R. **Método de avaliação e de previsão da trafegabilidade de viaturas militares em solos brasileiros**. Tese (Doutorado), Programa de Pós-graduação em Engenharia de Defesa, Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=7259257#. Acesso em: 22 nov. 2023.

COSTA-CABRAL, M. C.; BURGESS, S. J. Digital elevation model networks (Demon): a model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. **Water Resour Res.**, v. 30, n. 6, p. 1681-1692, 1994. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Mariza-Costa-Cabral/publication/233756725_Digital_Elevation_Model_Networks_DEMON_A_model_of_flow_over_hillslopes_for_computation_of_contributing_and_dispersal_areas/links/0912f50b3c13976e7d000000/Digital-Elevation-Model-Networks-DEMON-A-model-of-flow-over-hillslopes-for-computation-of-contributing-and-dispersal-areas.pdf. Acesso em: 29 abr. 2024.

CUI, Y.; ZHENG, K.; LI, P.; WEI, H. Research on Global Path Planning Technology for Field Maneuver of Armored Platforms. In: 3rd International Conference on Artificial Intelligence, Internet of Things and Cloud Computing Technology. **Proceedings of 3rd International Conference on Artificial Intelligence, Internet of Things and Cloud Computing Technology (AloTC)**. Wuhan, China, p. 169-175, 2024. DOI. 10.1109/AloTC63215.2024.10748300.

DEVORE, J. L. **Probabilidade e Estatística para Engenharia e Ciências**. 9. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2018. 656 p.

DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. **Numer. Math.** 1, p. 269-271, 1959. DOI. 10.1007/BF01386390.

DIVISÃO DE GERAÇÃO DE IMAGENS (DGI). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Governo Federal. Brasil. **Níveis de processamento das imagens dos**

satélites CBERS e Amazônia. 2021. Disponível em:

<http://www.dgi.inpe.br/documentacao/arquivos/NiveisdeProcessamentoCBERSAMZ.pdf>. Acesso em: 05 maio 2024.

DUCASSE, E.; ADELIN, K.; HOHMANN, A.; ACHARD, V.; BOURGUIGNON, A.; GRANDJEAN, G.; BRIOTTET, X. Mapping of Clay Montmorillonite Abundance in Agricultural Fields Using Unmixing Methods at Centimeter Scale Hyperspectral Images. **Remote Sens**, v. 16, n. 17, 3211, 2024, DOI. 10.3390/rs16173211.

DUTTA, A.; BANERJEE, M.; RAY, R. Land capability assessment of Sali watershed for agricultural suitability using a multi-criteria-based decision-making approach. **Environ Monit Assess**, v. 196, n. 237, 2024. DOI. 10.1007/s10661-024-12393-9.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, DF: Embrapa Solos, 5. ed., 2018. 353 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/199517/1/SiBCS-2018-ISBN-9788570358004.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E EXTENSÃO RURAL DE SANTA CATARINA (Epagri). **Recomendações para a produção de arroz irrigado em Santa Catarina**. Florianópolis, SC: n. 56, 4. ed., 2022. Disponível em: <https://publicacoes.epagri.sc.gov.br/SP/article/view/1587>. Acesso em: 25 maio 2024.

ESPÍNDOLA, R. U.; FERNÁNDEZ, S. M. Simulation and Analysis of Land Use Changes Applying Cellular Automata in the South of Quito and the Machachi Valley, Province of Pichincha, Ecuador. **Sustainability**, n. 13, 9525, 2021. DOI. <https://doi.org/10.3390/su13179525>.

ESPÍRITO SANTO. Sistema Integrado de Bases Geoespaciais do Estado do Espírito Santo. **GEOBASES**. Disponível em: <https://geobases.es.gov.br/>. 2024. Acesso em: 10 jun. 2024.

FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 12, p. 4302-4315, 2017. DOI. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>.

FJELD, D.; PERSSON, M.; FRANSSON, J. E. S.; BJERKETVEDT, J.; BRÅTHEN, M. Modelling forest road trafficability with satellite-based soil moisture variables. **International Journal of Forest Engineering**, v. 35, n.1, p. 93-104, 2024. DOI. <https://doi-org.ez22.periodicos.capes.gov.br/10.1080/14942119.2023.2276628>.

FLETCHER, R. S. Comparing Pan-Sharpening Algorithms to Access an Agriculture Area: A Mississippi Case Study. **Agricultural Sciences**, v. 14, p. 1206-1221, 2023. DOI. <https://doi.org/10.4236/as.2023.149081>.

FLORES, A. N.; ENTEKHABI, D.; BRAS, R. L. Application of a hillslope-scale soil moisture data assimilation system to military trafficability assessment. **Journal of Terramechanics**, v. 51, p. 53-66, 2014. DOI. doi.org/10.1016/j.jterra.2013.11.004.

GAMBO, J.; ROSLAN, S. N. A. B.; SHAFRIB, H. Z. M.; YA, N. N. C.; YUSUF, Y. A. Unveiling groundwater potential zones as catalyst for multidimensional poverty reduction using analytical hierarchical process and geospatial decision support systems (S-DSS) approach in the semiarid region, Jigawa, Nigeria. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 24, 2024. DOI. 10.1016/j.gsd.2023.101038.

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

GARCÍA-ÁLVAREZ, D.; OLMEDO, M. T. C.; PAEGELOW, M.; MAS, J. F. Land Use Cover Datasets and Validation Tools – Validation Practices with QGIS. **Springer**, Cham, Switzerland, 2022. DOI. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-90998-7>.

GIDEY, E.; MHANGARA, P. An Application of Machine-Learning Model for Analyzing the Impact of Land-Use Change on Surface Water Resources in Gauteng Province, South Africa. **Remote Sens**, [S. l.], v. 15, 4092, 2023. DOI. 10.3390/rs15164092.

GRANDJEAN, G.; ANGELLIAUME, S. The ECORS system: A mobility decision-making tool based on Earth observation data. In: IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 17 ago. 2009. **Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium**. Cape Town, South Africa: [S. n.], p. 350-355, 2009. DOI. 10.1109/IGARSS.2009.5417657.

GROGAN, A. Creating a spatial analysis model for generating composite cost surfaces to depict cross country mobility in natural terrain. In: ASPRS/MAPPS FALL CONFERENCE, 2009. **Proceedings of the ASPRS/MAPPS Fall Conference** [...]. San Antonio, Texas: [S. n.], 2009. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/CREATING-A-SPATIAL-ANALYSIS-MODEL-FOR-GENERATING-TO-Grogan/1f952330ce338719a050eba590d538e0dea03f2a>. Acesso em: 20 ago. 2023.

GUMOS, A. K. **Modelling the Cross-Country Trafficability with Geographical Information Systems**. Independent thesis advanced level – Linköping University, Department of Computer and Information Science, Suécia, 2005. 123 p. Disponível em: <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-313>. Acesso em: 16 ago. 2023.

HASANZAEH, M.; KAMRAN, K. V.; FEIZIZADEH, B.; MOLLABASHI, S. H. GIS based spatial decision-making approach for solar energy site selection, Ardabil, Iran. **International Journal of Engineering and Geosciences**, v. 9, n. 1, p. 115-130, 2024. DOI. <https://doi.org/10.26833/ijeg.1341451>.

HASSAN, W. H.; MAHDI, K.; KADHIM, Z. K. GIS-based multi-criteria decision making for identifying rainwater harvesting sites. **Appl Water Sci**, v. 15, n. 45, 2025. DOI. <https://doi.org/10.1007/s13201-025-02378-5>.

HE, K.; DONG, Y.; HAN, W.; ZHANG, Z. An assessment on the off-road trafficability using a quantitative rule method with geographical and geological data. **Computers & Geosciences**, [S. l.], v. 177, 2023. DOI. doi.org/10.1016/j.cageo.2023.105355.

HESTERA, H.; PAHERNIK, M. Physical-geographic factors of terrain trafficability of military vehicles according to Western World methodologies. **Croatian Geographical Bulletin**, v. 80, p. 5-31, 2018. DOI. <https://doi.org/10.21861/HGG.2018.80.02.01>.

HESTERA, H.; PAHERNIK, M.; ZELIĆ, B. K.; MALJKOVIĆ, M. M. The Unified Soil Classification System Mapping of the Pannonian Basin in Croatia using Multinomial Logistic Regression and Inverse Distance Weighting Interpolation. **RGNZ/MGPB**, [S. l.], v. 38, n. 3, p. 147-159, 2023. DOI. 10.17794/rgn.2023.3.12.

HÖFIG, P.; ARAUJO-JUNIOR, C. F. Classes de declividade do terreno e potencial para mecanização no estado do Paraná. **Coffee Science**, v. 10, n. 2, p. 195-203, 2015. Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/8117>. Acesso em: 17 ago. 2023.

HOFMANN, A.; KOVARIK, V.; TALHOFER, V.; HOŠKOVÁ-MAYEROVÁ, S. Creation of models for calculation of coefficients of terrain passability. **Quality and Quantity**, v. 49, p. 1-13, 1 jul. 2014. DOI. <https://doi.org/10.1007/s11135-014-0072-1>.

HORN, B. K. P. Hill shading and the reflectance map. **Proc IEEE**, v. 69, n. 1, p. 14-47, 1981. DOI. 10.1109/PROC.1981.11918.

HUA, C.; JIANG, C.; NIU, R.; FU, X.; CHEN, Z.; KUANG, X.; YU, B. Double Neural Networks Enhanced Global Mobility Prediction Model for Unmanned Ground Vehicles in Off-road Environments. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 73, n. 6, p. 7547-7560, 2024. DOI. 10.1109/TVT.2024.3351677.

HUA, C.; NIU, R.; JIANG, C.; YU, B.; ZHU, H.; LI, B. Efficient and High-Fidelity Mobility Prediction for Unmanned Ground Vehicles Based on Gaussian Sampled Terrain and Enhanced Neural Network. **IEEE Robot. Autom. Lett.**, v. 8, n. 12, p. 8422-8429, 2023. DOI. <https://doi.org/10.1109/lra.2023.3329349>.

HUBACEK, M.; KOVARIK, V.; TALHOFER, V.; RYBANSKY, M.; HOFMANN, A.; BŘEŇOVÁ, M.; ČEPLOVÁ, L. Modelling of geographic and meteorological effects on vehicle movement in the open terrain. In: 23rd Central European Conference. **Proceedings of 23rd Central European Conference**. Brno, Czech Republic: [S. n.], 1º jan. 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/307877346_MODELING_OF_GEOGRAPHIC_AND_METEOROLOGICAL_EFFECTS_ON_VEHICLE_MOVEMENT_IN_THE_OPEN_TERRAIN. Acesso em: 17 ago. 2023.

HUBACEK, M.; RYBANSKY, M.; BRENOVA, M.; CEPLOVA, L. The soil trafficability measurement in the Czech Republic for military and civil use. In: 18th International Conference of the ISTVS. **Proceedings of the 18th International Conference of the ISTVS** [...]. Seoul, Korea: p. 22-25, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/268818255_The_soil_trafficability_measurement_in_the_czech_republic_for_military_and_civil_use. Acesso em: 22 ago. 2023.

HU, Y.; RAZA, A.; SYED, N. R.; ACHARKI, S.; RAY, R. L.; HUSSAIN, S.; DEHGHANISANIJ, H.; ZUBAIR, M.; ELBELTAGI, A. Land Use/Land Cover Change Detection and NDVI Estimation in Pakistan's Southern Punjab Province. **Sustainability**, [S. l.], v. 15, 2023. DOI. <https://doi.org/10.3390/su15043572>.

IGHRAVWE, D. E.; OLANREWAJU, O. A. Evaluating the desirability of energy inequality mitigation strategies within underserved communities in sub-Saharan Africa. **Discov Sustain**, v. 6, n. 57, 2025. DOI. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00759-5>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Noções básicas de cartografia**. Manual técnico n. 8. Rio de Janeiro: IBGE, 1999. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv8595_v1.pdf. Acesso em: 26 jan. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Malhas territoriais das unidades da federação**. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 29 maio 2024.

INFRAESTRUTURA DE DADOS ESPACIAIS AMBIENTAIS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IDEA-SP). Governo de São Paulo. **DataGEO**. 2025. Disponível em: <https://datageo.ambiente.sp.gov.br>. Acesso em: 4 mar. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Dados climáticos históricos**. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 25 maio 2024.

JEDI, Z. A. J.; JAWARI, S. M. Prediction of formal transformations in city structure (Kufa as a model) based on the cellular automation model and Markov chains. **International Journal of Sustainable Development and Planning**, [S. l.], v. 18, n. 5, p. 1417-1424, 2023. DOI. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.180512>.

JENKS, G. F. The data model concept in statistical mapping. **International yearbook of Cartography**, v. 7, p. 186-190, 1967.

JOVANOVIC, A.; UZELAC, A.; KUKIC, K.; TEODOROVIC, D. The shortest-path and bee colony optimization algorithms for traffic control at single intersection with NetworkX application. **Demonstratio Mathematica**, v. 57, n. 1, 2024. DOI. <https://doi.org/10.1515/dema-2023-0160>.

KALUGAMUWA, K.; DINUSHA, K. A.; SANDAMALI, K. U. J. GIS Mechanism For Terrain Trafficability. In: 13TH INTERNATIONAL RESEARCH CONFERENCE. **Proceedings of the 13th International Research Conference** [...]. Dehiwala-Mount Lavinia, Sri Lanka: General Sir John Kotelawala Defence University, out. 2020. Disponível em: <http://ir.kdu.ac.lk/handle/345/3280>. Acesso em: 20 ago. 2023.

KATONA, K.; NEAMAH, H. A.; KORONDI, P. Obstacle Avoidance and Path Planning Methods for Autonomous Navigation of Mobile Robot. **Sensors**, v. 24, n. 11, 2024. DOI. <https://doi.org/10.3390/s24113573>.

KHAN, M.; KASHIF, M.; SHAH, A. Off-road Trafficability for Military Operations Using Multi-Criteria Decision Analysis. **International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS**, [S. l.], v. 10, p. 3425-3437, 2021. DOI. 10.23953/cloud.ijarsg.489.

KNIGHT, S. J. **Trafficability of Soils: a Summary of Trafficability Studies through 1955**. Technical report, n. 3, 14th Supplement, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Estados Unidos: Vicksburg, Mississippi, 1956. Disponível em: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc303869/>. Acesso em: 22 nov. 23.

LEITE, M. J. H. Características gerais dos principais solos da região semiárida. **RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar**, [S. l.], v. 3, n. 10, 2022. DOI. 10.47820/recima21.v3i10.1964.

LIN, Y. Dijkstra and A* algorithms in automated vehicle driving. In: Proc. SPIE, 28 fev. 2024. **International Conference on Mechatronic Engineering and Artificial Intelligence**, MEAI 2023, 130712F, v. 13071, fev. 2024. DOI. 10.1117/12.3025670.

LIU, Z.; GUO, S.; YU, F.; HAO, J.; ZHANG, P. Improved A* Algorithm for Mobile Robots under Rough Terrain Based on Ground Trafficability Model and Ground Ruggedness Model. **Sensors**, v. 24, n. 15, 2024. DOI. doi.org/10.3390/s24154884.

MAJDOUBI, R.; MASMOUDI, L.; ELHARIF, A. Analysis of soil compaction under different wheel applications using a dynamical cone penetrometer. **Journal of Terramechanics**, v. 111, p. 21-30, 2024. DOI. 10.1016/j.jterra.2023.09.001.

MAPBIOMAS. Brasil. **Pontos de validação**. 2023. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/pontos-de-validacao/>. Acesso em: 12 ago. 2024.

MATTIVI, P.; FRANCI, F.; LAMBERTINI, A.; GABRIELE, G. TWI computation: a comparison of different open source GISs. **Open geospatial data, softw. stand.**, v. 4, n. 6, 2019. DOI. <https://doi.org/10.1186/s40965-019-0066-y>.

MATTSON, I. Q.; JEFFRIES, Z. D.; MAJHOR, C. D.; BOS, J. P. Rut depth detection for automated trafficability assessment. In: SPIE Defense + Commercial Sensing. **Proceedings of SPIE, Autonomous Systems: Sensors, Processing, and Security for Ground, Air, Sea, Space Vehicles and Infrastructure**. 2023. Estados Unidos: Orlando, Florida, v. 12540, p. 1-8, 13 jun. 2023. DOI. 10.1117/12.2664429.

MAZZON, J. A. **Análise do programa de alimentação do trabalhador sob o conceito de marketing social**. Tese de Doutorado - Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo, São Paulo. 1981. DOI. <https://doi.org/10.11606/T.12.1981.tde-10032023-095351>.

MELNYK, A. A.; YACHNIUK, M. O. Application of geoinformation technologies for forest cover monitoring. Scientific Bulletin of Kherson State University. **Geographical Sciences**, [S. l.], v. 16, p. 32-39, 2022. DOI. 10.32999/ksu2413-7391/2022-16-3.

MIYOMBO, M. E.; LIU, Y. L.; MULENGA, C. M.; SIAMULONGA, A.; KABANDA, M. C.; SHABA, P.; XI, C.; AYODEJI, A. Optimal path planning in a real-world radioactive environment: A comparative study of A-star and Dijkstra algorithm. **Nuclear Engineering and Design**, v. 420, 2024. DOI. 10.1016/j.nucengdes.2024.113039.

MULLER, S. F. **Levantamento pedológico detalhado de áreas no oeste catarinense**. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo). Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo, Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Lages, 2020. Disponível em: www.udesc.br/arquivos/cav/id_cpmenu/2480/Disserta_o_2_16177239688583_2480.pdf. Acesso em: 2 abr. 2024.

OLIVEIRA, I. C. **O uso da análise espacial no processo de integração terreno, condições meteorológicas e inimigo (PITCI) do Exército brasileiro**. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília (UnB), Brasília, DF, 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/40437463_O_uso_da_analise_espacial_no_processo_de_integracao_terreno_condicoes_meteorologicas_e_inimigo_PITCI_do_exercito_brasileiro. Acesso em: 19 ago. 2023.

OPENSTREETMAP (OSM). **Mapa online**. 2024. Disponível em: <https://www.openstreetmap.org/>. Acesso em: 25 maio 2024.

OUMA, Y. O.; KEITSILE, A.; NKWAE, B.; ODIRILE, P.; MOALAFHI, D.; QI, J. Urban land-use classification using machine learning classifiers: comparative evaluation and post-classification multi-feature fusion approach. **European Journal of Remote Sensing**, v. 56, n. 1, 2023. DOI. 10.1080/22797254.2023.2173659.

OZEGIN, K. O.; ILUGBO, S. O.; ADEBO, B. Spatial evaluation of groundwater vulnerability using the DRASTIC-L model with the analytic hierarchy process (AHP) and GIS approaches in Edo State, Nigeria. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 134, 2024. DOI. 10.1016/j.pce.2024.103562.

PARTIDA, R. D. L. **Geotecnologias e análise espacial: planejamento de mobilidade com unidades blindadas tipo lagarta na bacia hidrográfica do lago de Maracaibo - Venezuela**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), 2017. 132 p. Disponível em: repositorio.ufsm.br/handle/1/14417. Acesso em: 19 ago. 2023.

PERNAMBUCO. Secretaria de Recursos Hídricos e Saneamento. **Projeto Pernambuco Tridimensional (PE3D)**. 2016. Disponível em: <https://pe3d.pe.gov.br/>. Acesso em: 13 jan. 2025.

PERRUT, R. H. P.; BRITO, L. A. T. Cartografia Rápida: uma Abordagem das Principais Variáveis nos Desastres de Inundação e Modelagem Conceitual da Consciência Situacional. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], v. 74, n. 2, p. 248-265, 2022. DOI: 10.14393/rbcv74n2-63303.

PHAN, T. N.; KUCH, V.; LEHNERT, L. W. Land cover classification using Google Earth Engine and random forest classifier: The role of image composition. **Remote Sens**, v. 12, 2411, 2020. DOI. <https://doi.org/10.3390/rs12152411>.

PIMENTA, L. B.; BELTRÃO, N. E. S.; GEMAQUE, A. M. S.; TAVARES, P. A. Processo Analítico Hierárquico (AHP) em ambiente SIG: temáticas e aplicações voltadas à tomada de decisão utilizando critérios espaciais. **Interações (Campo Grande)**, [S. l.], v. 20, n. 2, p. 407-420, 2019. DOI. 10.20435/inter.v20i2.1856.

PIMPA, W. **Terrain analysis for path finding of combat cross-country movement**. Thesis (Doctorate in Philosophy and Geoinformatics), School of Remote Sensing, Suranaree University of Technology, Tailândia, 2012. 241 p. Disponível em: <http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/handle/123456789/4972>. Acesso em: 21 ago. 2023.

PIMPA, W.; SARAPIROME, S.; DASANANDA, S. GIS application to development of military cross-country movement maps at Mae Sot district, western Thailand. **Suranaree Journal of Science and Technology**, v. 21, n. 3, p. 215-232, 1 jan. 2014. DOI. <https://doi.org/10.14456/sjst.2014.26>.

POKONIECZNY, K. Automatic military passability map generation system. In: International Conference on Military Technologies (ICMT), 1º maio 2017. **Proceedings of the International Conference on Military Technologies [...]**. Brno, Czech Republic: [S. n.], p. 285-292, 2017. DOI. 10.1109/MILTECHS.2017.7988771.

POKONIECZNY, K. Comparison of land passability maps created with use of different spatial data bases. **Geografie**, v. 123, n. 3, p. 317-352, set. 2018a. DOI. <https://doi.org/10.37040/geografie2018123030317>.

POKONIECZNY, K. Methodology of cartographic visualisation of military maps of passability. In: 7th International Conference on Cartography and GIS, 2018b. **Proceedings of the 7th International Conference on Cartography and GIS [...]**. Sozopol, Bulgaria: [S. n.], p. 613-622, jun. 2018b. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/330534058_Methodology_of_cartographic_visualisation_of_military_maps_of_passability. Acesso em: 08 fev. 2024.

POKONIECZNY, K. Use of a Multilayer Perceptron to Automate Terrain Assessment for the Needs of the Armed Forces. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 7, n. 11, 430, 2018c. DOI. <https://doi.org/10.3390/ijgi7110430>.

POKONIECZNY, K. The Methodology of Creating Variable Resolution Maps Based on the Example of Passability Maps. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 9, n. 12, 738, 2020. DOI. <https://doi.org/10.3390/ijgi9120738>.

POKONIECZNY, K. Methodology of developing the dynamic maps of passability. In: Bandrova, Konecny, & Marinova. **Proceedings of 8th International Conference on Cartography and GIS**. Bulgarian Cartographic Assoc, Nessebar, Bulgaria, ISSN 1314-0604, v. 2, p. 244-252, 20 a 25 jun. 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/368364984_METHODODOLOGY_OF_DEVELOPING_THE_DYNAMIC_MAPS_OF_PASSABILITY. Acesso em: 21 set. 2023.

POKONIECZNY, K.; BORKOWSKA, S. Using High Resolution Spatial Data to Develop Military Maps of Passability. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MILITARY TECHNOLOGIES (ICMT), 1 maio 2019. **Proceedings of the International Conference on Military Technologies (ICMT) [...]**. Brno, Czech Republic: [s. n.], p. 1-8, 2019. DOI. 10.1109/MILTECHS.2019.8870022.

POKONIECZNY, K.; DAWID, W. The application of artificial neural networks for the generalisation of military passability maps. **International Journal of Cartography**, [S. l.], p. 1-16, 2023. DOI. 10.1080/23729333.2023.2231589.

POKONIECZNY, K.; DAWID, W.; BORKOWSKA, S. Comparison of the military maps of trafficability developed by different methods. In: International Conference on Military Technologies (ICMT), 2021. **Proceedings of the International Conference on Military Technologies** [...]. Brno, Czech Republic, p. 1-8, 2021. DOI. 10.1109/ICMT52455.2021.9502833.

POKONIECZNY, K.; DAWID W.; WYSZYŃSKI, M. Methodology of using pathfinding methods in military passability maps. In: International Conference on Military Technologies (ICMT). **Proceedings of the International Conference on Military Technologies (ICMT)**. Brno, República Tcheca, p. 1-6, 2023. DOI. 10.1109/ICMT58149.2023.10171255.

POKONIECZNY, K.; MOSCICKA, A. The Influence of the Shape and Size of the Cell on Developing Military Passability Maps. **International Journal of Geo-Information (Int. J. Geo-Inf)**, v. 7, p. 261-288, 3 jul. 2018. DOI. doi.org/10.3390/ijgi7070261.

POKONIECZNY, K.; RYBANSKY, M. Method of developing the maps of passability for unmanned ground vehicles. IOP Conference Series: **Earth and Environmental Science**, v. 169, n. 1, p. 1-9, jun. 2018. DOI. 10.1088/1755-1315/169/1/012027.

POTIC, I.; STOJANOVIC, M.; CURCIC, N.; DORDEVIC, D.; BANKOVIC, R. Development of geospatial passability maps: a multicriteria analysis approach. **Journal of the Geographical Institute Jovan Cvijic**, v. 74, n. 1, p. 29-45, 2024. DOI. <https://doi.org/10.2298/IJGI230822002P>.

POTTER, R. O.; CARVALHO, A. P.; FLORES, C. A.; BOGNOLA, I. **Solos do Estado de Santa Catarina**. Boletim de pesquisa e desenvolvimento n. 46. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. 721 p. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/88186/1/BPD-46-2004-Santa-Catarina-.pdf>. Acesso em: 2 abr. 2024.

PUNDIR, S. K.; GARG, R. D. Development of mapping techniques for off road trafficability to support military operation. **Spatial Information Research**, v. 28, n. 4, p. 495-506, ago. 2020a. DOI. <https://doi.org/10.1007/s41324-019-00310-z>.

PUNDIR, S. K.; GARG, R. D. Development of rule-based approach for assessment of off-road trafficability using remote sensing and ancillary data. **Quaternary International**, v. 5, p. 575–584, 1 jul. 2020b. DOI. 10.1016/j.quaint.2020.07.017.

PUNDIR, S. K.; GARG, R. D. Development of an empirical relation to assess soil spatial variability for off-road trafficability using terrain similarity analysis & geospatial data. **Remote Sensing Letters**, v. 12, n. 3, p. 259-268, 4 mar. 2021. DOI. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2021.1880657>.

PUNDIR, S. K.; GARG, R. D. A comprehensive approach for off-road trafficability evaluation and development of modified equation for estimation of RCI to assess regional soil variation using geospatial technology. **Quaternary Science Advances**, v. 5, p. 1-16, 1 jan. 2022. DOI. <https://doi.org/10.1016/j.qsa.2021.100042>.

QGIS. **Desktop User Guide/Manual**. QGIS Project, v. 3.28, 2023. Disponível em: https://docs.qgis.org/3.28/en/docs/user_manual/index.html. Acesso em: 30 jan. 2024.

QIU, R.; JU, Z.; GONG, X.; ZHANG, X.; TAO, G.; GONG, J. Real-Time Terrain-Aware Path Optimization for Off-Road Autonomous Vehicles. **IEEE Intelligent Vehicles Symposium**, Jeju Island, Korea, n. 4, p. 2078-2084, 2024. DOI. 10.1109/IV55156.2024.10588749.

QUINN, P.; BEVEN, K.; CHEVALLIER, P.; PLANCHON, O. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. **Hydrol Process**, v. 5, n. 1, p. 59-79, 1991. DOI. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050106>.

RADA, J.; RYBANSKY, M.; DOHNAL, F. Influence of Quality of Remote Sensing Data on Vegetation Passability by Terrain Vehicles. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 9, n. 11, nov. 2020. DOI. <https://doi.org/10.3390/ijgi9110684>.

RADA, J.; RYBANSKY, M.; DOHNAL, F. The Impact of the Accuracy of Terrain Surface Data on the Navigation of Off-road Vehicles. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 10, n. 3, p. 106-124, mar. 2021. DOI. 10.3390/ijgi10030106.

RATKE, C. **Amostragem Estratificada: Algoritmo para Identificação de Características para Estratificação**. 1. ed. [S. I.]: Novas Edições Acadêmicas, 2018.

RAUF, O.; NING, Y.; MING, C.; HAOXIANG, M. Evaluation of Ground Pressure, Bearing Capacity, and Sinkage in Rigid-Flexible Tracked Vehicles on Characterized Terrain in Laboratory Conditions. **Sensors**, v. 24, n. 6, 2024. DOI. <https://doi.org/10.3390/s24061779>.

REHRER, S. E.; GRIFFIN, A. W.; RENNER, M. **Cross country mobility (CCM) modeling using triangulated irregular networks (TIN)**. Technical Report, ERDC/GRL TR-22-5. EUA: Engineer Research and Development Center (U.S.), 2022. Disponível em: <https://erdc-library.erdcdren.mil/jspui/handle/11681/46082>. Acesso em: 21 ago. 2023.

RILEY, S. J.; DEGLORIA, S. D.; ELLIOT, R. Terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. **Int. J. Sci**, [S. I.], n. 5, p. 23-27, 1999. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/259011943>. Acesso em: 24 mar. 2024.

ROSE, E. P. F.; CLATWORTHY, J. C. Mud and blood in the final months of World War II: 'soil' maps of north-west Germany that helped to guide British and Canadian military operations in early 1945. **The Cartographic Journal**, 2024. DOI. 10.1080/00087041.2024.2376375.

ROSS, T. J. **Fuzzy logic with engineering applications**. 3. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2010. DOI. 10.1002/9781119994374.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; DEERING, D. W.; SCHELL, J. A.; HARLAN, J. C. **Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of**

Natural Vegetation. NASA/GSFC Type III Final Report. Greenbelt, 1974. 371 p. Disponível em: ntrs.nasa.gov/citations/19740022555. Acesso em: 15 set. 2023.

RSOFFROAD. **Serra catarinense.** 2024. Disponível em: https://rsoffroad.com.br/?page_id=1363. Acesso em 09 jul. 2024.

RUSH, E. S. **Trafficability tests with Jumbo truck on organic and coarse-grained mineral soils.** Technical report. Army Engineer Waterways Experiment Station. Estados Unidos: Vicksburg, Mississippi, p. 1-24, 1961. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/AD0756331>. Acesso em: 21 set. 2023.

RUSH, E. S. **Trafficability tests with the 5-ton GOER (XM520) on fine-and coarse- grained soils.** Technical report. Army Engineer Waterways Experiment Station. Estados Unidos: Vicksburg, Mississippi, p. 1-30, 1962. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/AD0646591>. Acesso em: 21 set. 2023.

RUSH, E. S. Trafficability tests with two vehicles with 9 to 10-ton wheel loads. **Journal of Terramechanics**, [S. l.], v. 4, n. 1, ISSN 0022-4898, p. 31-48, 1967. DOI. [https://doi.org/10.1016/0022-4898\(67\)90102-4](https://doi.org/10.1016/0022-4898(67)90102-4).

RYBANSKY, M. Effect of the Geographic Factors on the Cross-Country Movement during Military Operations and the Natural Disasters. In: CARTOGRAPHIC RENAISSANCE. **Proceedings of the 21st International Cartographic Conference (ICC)** [...]. Brno, Czech Republic: [S. n.], 2007. Disponível em: www.semanticscholar.org/paper/Effect-of-the-Geographic-Factors-on-the-Cross-and-Rybansky/823e70ccf260cdc2336956935e11a9c79100107d. Acesso em: 17 ago. 2023.

RYBANSKY, M. Determination the ability of military vehicles to override vegetation. **Journal of Terramechanics**, v. 91, p. 129-138, 2020. DOI. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2020.06.004>.

RYBANSKY, M.; HOFMANN, A.; HUBACEK, M.; KOVARIK, V.; TALHOFER, V. Modelling of cross-country transport in *raster* format. **Environmental Earth Sciences**, v. 74, n. 10, p. 7049-7058, nov. 2015. DOI. 10.1007/s12665-015-4759-y.

RYBANSKY, M.; HUBACEK, M.; HOFMANN, A.; KOVARIK, V.; TALHOFER, V. The Impact of Terrain on Cross-Country Mobility – Geographic Factors and their Characteristics. In: 18TH INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE ISTVS, 1º jan. 2014. **Proceedings of the 18th International Conference of the ISTVS** [...]. Seoul, Korea: [S. n.], 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/276847750_The_Impact_of_Terrain_on_Cross-Country_Mobility-_Geographic_Factors_and_their_Characteristics. Acesso em: 21 ago. 2023.

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process - what it is and how it is used. **Mathematical Modelling**, v. 9, n. 3, ISSN 0270-0255, p. 161-176, 1987. DOI. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8).

SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, v. 15, n. 3, p. 234-281, 1977. DOI. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5).

SAATY, T. L. **Fundamentals of decision making and priority theory with analytical hierarchical process**. The AHP Series, University of Pittsburgh. Pittsburgh: RWS Publications, v. 6, 1980.

SAATY, T. L. How to make a decision: the Analytic hierarchy process. **Eur. J. Oper. Res**, v. 48, p. 9-26, 1990. DOI. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I).

SAATY, T. L. **The Seven Pillars of the Analytic Hierarchy Process**. Multiple Criteria Decision Making in the New Millennium. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Springer, Berlin, Heidelberg, v. 507, 2001. DOI. https://doi.org/10.1007/978-3-642-56680-6_2.

SAATY, T. L. Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary. **European Journal of Operational Research**, v. 145, n. 1, p. 85-91, 2003. DOI. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00227-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00227-8).

SADIYA, T. B.; JAMES, G. K.; OLADITI, I. Military Terrain Trafficability Analysis for North-East Nigeria: A GIS and Remote Sensing-Based Approach. **IOSR Journal of Mobile Computing & Application**, v. 4, n. 1, p. 34-46, fev. 2017. DOI. <https://doi.org/10.9790/0050-04013446>.

SALMIVAARA, A.; LAUNIAINEN, S.; PERTTUNEN, J.; NEVALAINEN, P.; POHJANKUKKA, J.; ALAILOMÄKI, J.; FINÉR, L. Towards dynamic forest trafficability prediction using open spatial data, hydrological modelling and sensor technology. Forestry. **An International Journal of Forest Research**, [S. l.], v. 93, n. 5, p. 662-674, 2020. DOI. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpaa010>.

SANDOVAL, S.; FLORES, J. G. E.; MUNIR, M. B. Urbanization and its impacts on land surface temperature and sea surface temperature in a tourist region in Mexico from 1990 to 2020. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 32, 2023. DOI. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101046>.

SANTA CATARINA. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável. **Sistema de Informações Geográficas de Santa Catarina (SIGSC)**. 2024. Disponível em: <https://sigsc.sc.gov.br/>. Acesso em: 13 fev. 2024.

SCHREIER, H.; LAVKULICH, L. M. A numerical terrain classification scheme for off-road terrain trafficability assessments. **Geoforum**, [S. l.], v. 9, n. 3, ISSN 0016-7185, p. 225-234, 1978. DOI. [https://doi.org/10.1016/0016-7185\(78\)90012-X](https://doi.org/10.1016/0016-7185(78)90012-X).

SCHREIER, H.; LAVKULICH, L. M. A Numerical Approach to Terrain Analysis for off-road trafficability. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. Canadá: Vancouver, v. 45, n. 5, p. 635-642, 1979. Disponível em: https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1979journal/may/1979_may_635-642.pdf. Acesso em: 21 set. 2023.

SECRETARIA DE ESTADO DA COMUNICAÇÃO (SECOM). Santa Catarina. SC. **Bom Retiro**. Nota de comunicação. 2014. Disponível em: <https://estado.sc.gov.br/noticias/bom-retiro>. Acesso em: 14 jul. 2024.

SECRETARIA DE ESTADO DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO SUSTENTÁVEL (SDE). Santa Catarina. **Dados do SIGSC**. Nota explicativa. 2016. Disponível em: https://sigsc.sc.gov.br/3_Nota_Explicativa_Metodologia%20de%20Consolidacao_do_Aerolavamento-SC_v1.pdf. Acesso em: 14 abr. 2024.

SHCHERBAKOV, A.; SOKOLOV, S. Multilayer maps of vehicle passability as a data source for solving transport problem. In: International Scientific Conference AFE-2022. **Proceedings of International Scientific Conference Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East (AFE-2022)**. E3S Web of Conferences, [S. l.], v. 371, p. 1-10, 2023. DOI. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337104037>.

SHEKHAR, S.; VAISHNAV, R.; KUMARI, A.; GAUTAM, S.; BANERJEE, S. Quantitative Comparison of Path Planning Algorithms in Simulated Environment. In: 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Machine Learning, 2024. **International Conference on Artificial Intelligence and Machine Learning**. Namakkal, India, p. 1-8, 2024. DOI. 10.1109/AIMLA59606.2024.10531565.

SILVA, L. M. L. **Modelos e métodos para análise multicritério e tomada de decisão espacial em ambiente de incertezas e suas aplicações**. Tese de Doutorado – Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte. 2020. Disponível em: www.ppgee.ufmg.br/defesas/1699D.PDF. Acesso em: 30 jun. 2023.

SOARES-FILHO, B. S.; CERQUEIRA, G. C.; PENNACHIN, C. L. Dinâmica - a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. **Ecological Modelling**, ISSN 0304-3800, v. 154, n. 3, p. 217-235, 2002. DOI. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00059-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00059-5).

STILLWELL, W. G.; SEAVER, D. A.; EDWARDS, W. A comparison of weight approximation techniques in multi-attribute utility decision making. **Organizational Behavior and Human Performance**, v. 28, n. 1, p. 62-77, 1981. DOI. [https://doi.org/10.1016/0030-5073\(81\)90015-5](https://doi.org/10.1016/0030-5073(81)90015-5).

SUBBARAYAN, S.; THIYAGARAJAN, S.; GANGOLU, S.; DEVANANTHAM, A.; MASTHAN, R. N. Assessment of groundwater vulnerable zones using conventional and Fuzzy-AHP DRASTIC for Visakhapatnam district, India. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 24, 2024. DOI. doi.org/10.1016/j.gsd.2023.101054.

SUVINEN, A. A GIS-based simulation model for terrain tractability. *Journal of Terramechanics*, v. 43, p. 427-449, 1 out. 2006. DOI. 10.1016/j.jterra.2005.05.002.

TAO, S.; ROGAN, J.; YE, S.; GERON, N. Mapping photovoltaic power stations and assessing their environmental impacts from multi-sensor datasets in Massachusetts, United States. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, [S. l.], v. 30, 2023. DOI. 10.1016/j.rsase.2023.100937.

THIEN, B. B.; PHUONG, V. T. Using Landsat satellite imagery for assessment and monitoring of long-term forest cover changes in Dak Nong province, Vietnam. **Geographica Pannonica**, [S. l.], v. 27, p. 69-82, 2023. DOI. 10.5937/gp27-41813.

TOBLER, W. R. A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. **Economic Geography**, v. 46, p. 234-240, 1970. DOI. doi.org/10.2307/143141.

TORREALBA, Y. V. **Mapa de transitabilidade para operações táticas com auxílio de SIG e sistema especialista**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal Paraná (UFPR), Curitiba, PR, 2015. 91 p. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/40826>. Acesso em: 18 ago. 2023.

TWAHA, R.; NOBERT, J.; ALEXANDER, A. C.; MULUNGU, D. M. M.; SENG, M. Delineating groundwater potential zones with GIS and analytic hierarchy process techniques: the case of Great Ruaha River catchment, Tanzania. **Hydrogeology Journal**, [S. l.], 2024. DOI. <https://doi.org/10.1007/s10040-024-02769-z>.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **What is remote sensing and what is it used for?**. 2018. Disponível em: https://www.usgs.gov/faqs/what-remote-sensing-and-what-it-used?qt-news_science_products=7#qt-news_science_products. Acesso em: 18 ago. 2023.

VELOZA, E. V. **O emprego da Geointeligência como ferramenta para aprimorar a análise do terreno no planejamento de operações militares do Exército brasileiro**. 2020. 109 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Sistemas de Informação Geográfica) – Universidade NOVA Information Management School (NIMS), Lisboa, Portugal, 2020. Disponível em: <https://run.unl.pt/handle/10362/98833>. Acesso em: 19 ago. 2023.

WANG, L.; LIU, H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. **Int J Geogr Inf Sci**, v. 20, n. 2, p. 193-213, 2006. DOI. 10.1080/13658810500433453.

WANG, X.; SHAFIEEZADEH, M. M. A decision framework for sustainable industrial water pollution control to protect marine environments. **Marine Pollution Bulletin**, v. 214, 2025. DOI. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117726>.

WANG, Z.; TU, J.; LIU, G.; ZHAO, Q. Applications of GIS rapid mapping technology in disaster monitoring. International Archives of the Photogrammetry (ISPRS). **Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, [S. l.], n. XLII-3, p. 1849-1851, 2018. DOI. 10.5194/isprs-archives-XLII-3-1849.

WEI, S.; DONG, Y.; QIU, Y.; LI, B.; LI, S.; DONG, C. Temporal and spatial analysis of vegetation cover change in the Yellow River Delta based on Landsat and MODIS time series data. **Environ Monit Assess**, [S. l.], v. 195, 1057, 2023. DOI. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11652-5>.

WICANDER, M. **Requirements for Cross Country Movement in Land Warfare**. Dissertação (Mestrado em Defesa) – Swedish Defence University, Suécia, 2018. 69

p. Disponível em: <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:fhs:diva-7411>. Acesso em: 20 ago. 2023.

WU, T.; LUO, J.; GAO, L.; SUN, Y.; DONG, W.; ZHOU, Y.; LIU, W.; HU, X.; XI, J.; WANG, C.; YANG, Y. Geo-Object-Based Vegetation Mapping via Machine Learning Methods with an Intelligent Sample Collection Scheme: A Case Study of Taibai Mountain, China. **Remote Sens**, v. 13, n. 2, 2021. DOI. 10.3390/rs13020249.

YAGER, R. R. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v. 8, n. 1, p. 183-190, 1988. DOI. 10.1109/21.87068.

YIN, J.; LI, L.; MOURELATOS, Z. P.; LIU, Y.; GORSICH, D.; SINGH, A.; TAU, S.; HU, Z. Reliable Global Path Planning of Off-Road Autonomous Ground Vehicles Under Uncertain Terrain Conditions. **IEEE Transactions on Intelligent Vehicles**, v. 9, n. 1, p. 1161-1174, 2024. DOI. 10.1109/TIV.2023.3317833.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, n. 3, p. 338-353, ISSN 0019-9958, 1965. DOI. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X).

ZENG, H.; ZHAO, C.; CHEN, S.; XUL, W.; ZANG, M. Numerical Simulations of Tire-Soil Interactions: A Comprehensive Review. **Arch Computat Methods Eng**, v. 30, p. 4801-4829, 2023. DOI. <https://doi.org/10.1007/s11831-023-09961-6>.

ZHAI, L.; LIU, C.; ZHANG, X.; WANG, C. Local Trajectory Planning for Obstacle Avoidance of Unmanned Tracked Vehicles Based on Artificial Potential Field Method. **IEEE Access**, v. 12, p. 19665-19681, 2024. DOI. 10.1109/ACCESS.2024.3355952.

ZHANG, L.; LIU, Z.; REN, T.; LIU, D.; MA, Z.; TONG, L.; ZHANG, C.; ZHOU, T.; ZHANG, X.; LI, S. Identification of seed maize fields with high spatial resolution and multiple spectral remote sensing using random forest classifier. **Remote Sens**, v. 12, 362, 2020. DOI. <https://doi.org/10.3390/rs12030362>.

ZHEN, Z.; CHEN, S.; YIN, T.; ETCHEGORRY, J. P. G. Improving Crop Mapping by Using Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) Signatures with Google Earth Engine. **Remote Sens**, v. 15, 2761, 2023. DOI. 10.3390/rs15112761.

ZHOU, Z.; ABDI, E.; CHEA, C. P.; BAI, Y. Global path planning for autonomous construction vehicles in building construction: A comparative study with a focus on vehicle kinematic characteristics. **Journal of Building Engineering**, v. 93, 2024. DOI. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109837>.

ZOU, D.; ZHAO, L.; LIU, G.; DU, E.; HU, G.; LI, Z.; WU, T.; WU, X.; CHEN, J. Vegetation Mapping in the Permafrost Region: A Case Study on the Central Qinghai-Tibet Plateau. **Remote Sensing**, [S. l.], v. 14, n. 1, 2022. DOI. 10.3390/rs14010232.

APÊNDICE 1 – CÓDIGO PYTHON DO FILTRO DE SOMBRAS (PYQGIS)

```

import numpy as np
from osgeo import gdal, gdal_array

# Função para encontrar o valor mais frequente (moda) excluindo sombras
def most_frequent(arr):
    arr = arr[(arr != 7) & (arr >= 0)] # Exclui sombras (se classe 7) e garante que não há valores negativos
    if len(arr) == 0:
        return 0 # Retorna 0 se todos os vizinhos forem sombras ou a célula estiver isolada
    return np.bincount(arr).argmax()

# Obtém o raster ativo
raster_layer = iface.activeLayer()
if not isinstance(raster_layer, QgsRasterLayer):
    print("A camada ativa não é um raster!")
else:
    print("Raster layer carregado com sucesso!")

# Pega o caminho do raster ativo
input_raster_path = raster_layer.dataProvider().dataSourceUri()

# Abre o raster usando GDAL
ds = gdal.Open(input_raster_path, gdal.GA_ReadOnly)
if ds is None:
    print("Erro ao abrir o raster!")
else:
    print("Raster aberto com sucesso!")

# Lê a primeira banda do raster
band = ds.GetRasterBand(1)
raster_data = band.ReadAsArray()
rows, cols = raster_data.shape

# Cria um array numpy para armazenar o raster modificado
filtered_data = np.copy(raster_data)

# Limite de iterações
max_iterations = 100
iterations = 0

while True:
    changes_made = False
    iterations += 1

```



```

for i in range(1, rows - 1):
    for j in range(1, cols - 1):
        if raster_data[i, j] == 7: # Se a célula é sombra (valor 7)
            # Extraí os valores dos 8 vizinhos
            neighbours = raster_data[i - 1:i + 2, j - 1:j + 2].flatten()
            neighbours = neighbours[neighbours != 7] # Exclui sombras explicitamente
            # Substitui pelo valor mais frequente entre os vizinhos
            new_value = most_frequent(neighbours)
            if new_value in [1,2,3,4,5,6]:
                filtered_data[i, j] = new_value
                changes_made = True
            else:
                filtered_data[i, j] = 7
                changes_made = True

if not changes_made or iterations >= max_iterations:
    break

raster_data = np.copy(filtered_data)

# Define o caminho para salvar o raster filtrado
output_raster_path = "C:/sombra.tif"

# Cria um novo dataset para o raster filtrado
driver = gdal.GetDriverByName('GTiff')
out_ds = driver.Create(output_raster_path, cols, rows, 1, gdal.GDT_Byte)
out_ds.SetGeoTransform(ds.GetGeoTransform())
out_ds.SetProjection(ds.GetProjection())

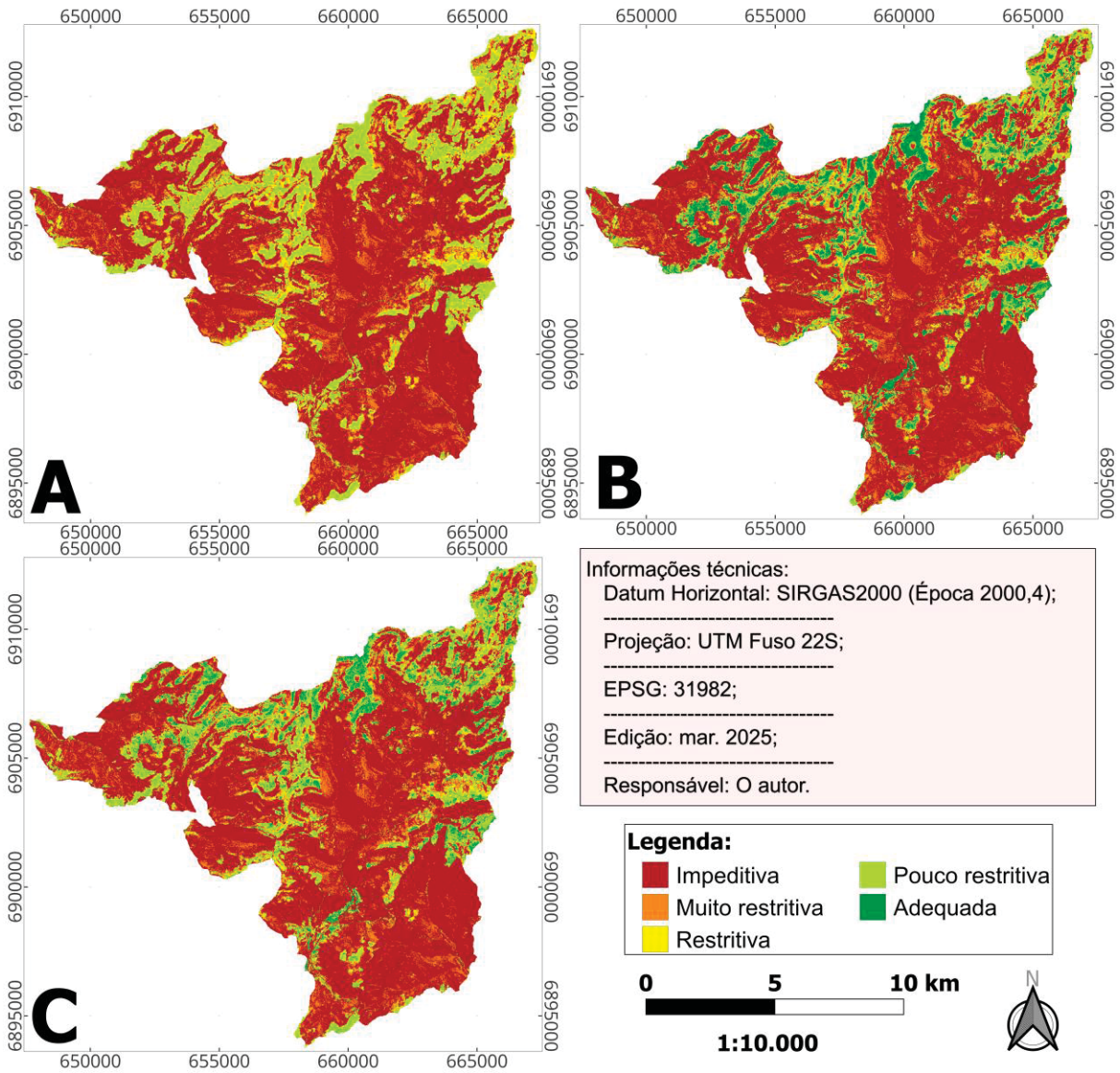
# Escreve os dados filtrados na nova banda
out_band = out_ds.GetRasterBand(1)
out_band.WriteArray(filtered_data)
out_band.SetNoDataValue(0)

# Fecha os datasets
out_band.FlushCache()
out_ds.FlushCache()
del out_ds

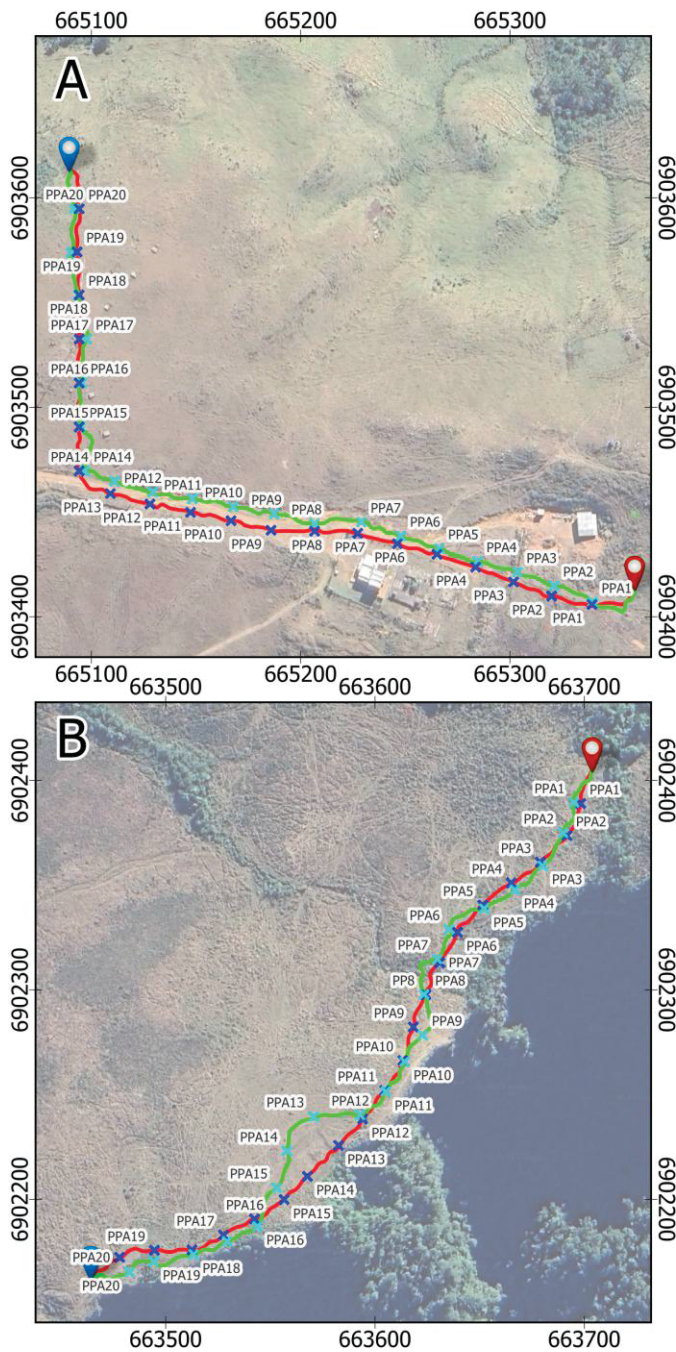
print("Raster filtrado salvo em:", output_raster_path)
print("Número de iterações realizadas:", iterations)

```

**APÊNDICE 2 – MAPAS DE TRAFEGABILIDADE DE VIATURAS PARA AS
ESTAÇÕES DO VERÃO (A), OUTONO (B) E PRIMAVERA (C)**



APÊNDICE 3 – PARES DE PONTOS AMOSTRAIS (PPAS) PARA CÁLCULO DO RMSE DE ROTAS AUTOMATIZADAS



Informações técnicas:

Datum Horizontal:
SIRGAS2000 (Época 2000,4);

Projeção: UTM Fuso 22S;

EPSG: 31982;

Base de dados:
Google Satellite (fundo);

Edição: jan. 2025;

Responsável: O autor.

Legenda:

Ponto:

- Origem
- Destino

Rota:

- Gerada pelo modelo
- Percorrida em campo

Par de Pontos Amostrais (PPA):

- Ponto sob rota gerada pelo modelo
- Ponto sob rota percorrida em campo