



Elaboração de Mapas de Trafegabilidade de Viaturas Utilizando Sensoriamento Remoto e SIG: uma Revisão Sistemática e Abrangente

Elaboration of Vehicle Trafficability Maps Using Remote Sensing and GIS: a Systematic and Comprehensive Review

Renan Fabres Dalmonech¹, Cláudia Maria de Almeida², Joel Borges dos Passos³ e Rodrigo de Campos Macedo⁴

¹ Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba, Brasil. renandalmonech@ufpr.br.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4289-9873>

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, Brasil. claudia.almeida@inpe.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6523-3169>

³ Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife, Brasil. joel.passos@ufpe.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9191-1691>

⁴ Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba, Brasil. rodrigo.macedo@ufpr.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5345-7149>

Recebido: 05.2024 | Aceito: 05.2025

Resumo: Os mapas de trafegabilidade de viaturas são produtos cartográficos que permitem aos usuários verificarem a previsão de terras trafegáveis, em áreas que não possuem arruamentos disponíveis para deslocamento à localidade de destino ou que estejam danificadas por eventos naturais, que podem impossibilitar o uso normal de vias construídas para o tráfego de viaturas. Nesses casos, o deslocamento fora de estrada, por terrenos pouco explorados, pode ser uma opção viável, com o planejamento do caminho a ser seguido auxiliado por mapas de trafegabilidade. Esses produtos cartográficos podem ser elaborados por meio de técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI), Sensoriamento Remoto (SR) e outros dados auxiliares. No presente estudo, foi realizada uma ampla pesquisa na rede mundial de computadores para verificação dos trabalhos publicados que tiveram como objeto de estudo os mapas de trafegabilidade, em um recorte temporal dos últimos 20 anos. Foram encontrados um total de 45 estudos, que foram devidamente analisados de modo a possibilitar a extração das principais informações e resultados alcançados. Os resultados indicam que a variável de relevo é a mais frequentemente utilizada (97,78%), seguida por vegetação (95,55%), corpos d'água (91,11%), tipo de solo (82,22%), feições antrópicas (80%), umidade do solo (60%) e condições meteorológicas (40%). A imensa maioria dos trabalhos operou em escala topográfica (71,11%). Uma parcela reduzida dos estudos realizou trabalhos de campo (31,11%), e a maior parte destinou-se à área militar (53,33%), concentrando-se os estudos de forma geral em países como Polônia, República Tcheca e Índia e ancorando-se em métodos paramétricos e não paramétricos diversos.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto. Movimento fora de estrada. SIG. Mapa de Trafegabilidade de Viaturas.

Abstract: Vehicle trafficability maps are cartographic products that allow users to check the forecast of trafficable land in areas that do not have roads available for travel to the destination or that have been damaged by natural events that may make it impossible to use roads built for vehicle trafficability. In these cases, off-road travel through poorly explored terrain can be a viable option, with the planning of the route to be followed aided by trafficability maps. These cartographic products can be produced using Digital Image Processing techniques, Remote Sensing (RS) and other auxiliary data. In this study, a wide-ranging search was carried out on the World Wide Web in order to verify published works whose object of study was trafficability maps, within a time frame of the last 20 years. A total of 45 studies were found and duly analyzed in order to extract the main information and results. The results indicate that the relief variable is the most frequently used (97.78%), followed by vegetation (95.55%), water bodies (91.11%), soil type (82.22%), anthropogenic features (80%), soil moisture (60%) and meteorological conditions (40%). Most of the studies operated on a topographic scale (71.11%). A small proportion of the studies carried out field work (31.11%), and most of them were aimed at the military (53.33%), with studies generally concentrated in countries such as Poland, the Czech Republic and India and using a variety of parametric and non-parametric methods.

Keywords: Remote Sensing. Cross-Country Movement. GIS. Vehicle Trafficability Map.

1 INTRODUÇÃO

A trafegabilidade de uma viatura – veículo automotor terrestre de transporte de pessoas ou materiais – pode ser compreendida como a habilidade para se deslocar de um ponto de origem a outro de destino. Em terrenos naturais, de campo, os estudos sobre a trafegabilidade se concentram na locomoção fora de estrada (*off-road*). Nesses ambientes, as viaturas enfrentam desafios maiores em seu movimento do que quando percorrem malhas viárias. Estas são preparadas anteriormente, por meio de obras de engenharia e com emprego de materiais que facilitam o escoamento da água, geram maior aderência com o meio de rolamento (pneus ou lagartas) e aumentam a capacidade de suporte do solo. São ainda projetadas com inclinações tão suaves quanto possível e de modo a não possuírem obstáculos impeditivos ao movimento (He et al., 2023).

O fenômeno da trafegabilidade estabelece uma forte ligação entre o terreno e a viatura, sendo uma região considerada inadequada ao movimento com viaturas se os fatores influenciadores forem muito restritivos ou impeditivos. O maior desafio do desenvolvimento de estudos para a elaboração de mapas de trafegabilidade é determinar o estado final dessas restrições ao movimento impostas pelo terreno, uma vez que há muitas combinações possíveis de fatores que interagem entre si (Pokonieczny & Dawid, 2023).

O deslocamento fora de estrada tem se tornado um assunto premente na atualidade, em vista da necessidade de auxílio em situações de exceção, como em casos de conflitos armados, litígios relativos a limites territoriais entre entes federativos ou em desastres naturais ou antrópicos (inundações, incêndios, deslizamentos, rompimentos de barragens). Tais deslocamentos necessitam de planejamento prévio, visto que, não raro, o trajeto não pode ser concluído devido a obstáculos ou atolamento, ou então, ocorrem acidentes com a viatura, implicando riscos patrimoniais e à vida humana. Cita-se ainda a economia de tempo e combustível, se comparado ao deslocamento fora de estrada não planejado.

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. Encontram-se na literatura, como sinônimos de mapa de trafegabilidade, os seguintes produtos cartográficos: mapa de restrições ao movimento (Oliveira, 2006; Partida, 2017; Veloza, 2020), mapa de transitabilidade (*passability map*) (Pokonieczny, 2017, 2018a, 2018b, 2018c, 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 et al., 2014; Pokonieczny & Rybansky, 2018; Rada et al., 2020, 2021; Rehrer et al., 2022; Rybansky, 2007; Rybansky et al., 2014; Rybansky et al., 2015; Wicander, 2018), mapa de mobilidade (*mobility map*) (Hua et al., 2023, 2024), desempenho de veículo através de campo (*cross-country vehicle performance*) (Gumos, 2005); além do próprio termo constante no título desta publicação (He et al., 2023; Höfig & Araujo-Junior, 2015; Hubacek et al., 2014; Kalugamuwa et al., 2020; Khan et al., 2021; Pokonieczny et al., 2021; Pundir & Garg, 2020a, 2020b, 2022; Sadiya et al., 2017; Suvinen, 2006).

Optou-se aqui pelo uso do termo mapa de trafegabilidade, o qual será utilizado no decorrer deste estudo de revisão, por ser o nome que, no entendimento destes autores, parece, em língua vernácula, melhor transmitir o sentido desse tipo de produto cartográfico temático. Não obstante, para a revisão da literatura, fundamentada no método PRISMA (Moher et al., 2009), utilizaram-se como filtro para busca dos trabalhos científicos as palavras-chave contendo todos os termos anteriormente citados (sinônimos) referentes a esse mesmo tipo de produto cartográfico. Para tanto, buscou-se realizar uma pesquisa ampla dos trabalhos publicados e disponíveis para consulta nas bases de dados *online* de literatura científica – especificamente na *Scopus*, *Web of Science* e *Google Scholar* – em um recorte temporal de pouco mais de 20 anos, estendendo-se de 1º de janeiro de 2004 a 15 de outubro de 2024, que tiveram como objeto o estudo e elaboração de mapas de trafegabilidade (critério de elegibilidade), com uso de Sensoriamento Remoto (SR), Processamento Digital de Imagens (PDI) e SIG.

Destaca-se que se encontram na literatura diversas publicações sobre a temática na área de Engenharia Agrícola, Engenharia Mecânica, Engenharia Agronômica 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. Cumpre salientar

que o objetivo do presente estudo foi verificar o estado da arte na elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas e identificar as principais variáveis influentes.

2 TRABALHOS RELACIONADOS

Nesta seção, foram dispostos os estudos publicados e disponíveis nas bases científicas utilizadas, referentes a aproximadamente 20 anos conforme anteriormente exposto, bem como o resumo das premissas, objetivos, problemas, materiais, métodos e principais características. Assim, com esse recorte temporal, tentou-se abranger os trabalhos que ainda possuem relevância e capacidade de contribuição suficiente para influenciar os futuros estudos sobre o fenômeno em análise. Foram encontrados um total de 45 estudos realizados sobre o tema, 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). Esses autores, na elaboração de seus respectivos estudos, tiveram como objetivos principais:

- a) identificar regiões onde as unidades militares pudessem se deslocar, em áreas adequadas, restritivas ou impeditivas, com uso de um conjunto de dados de SR e emprego de SIG (Flores et al., 2014; He et al., 2023; Hestera & Pahernik, 2018; Kalugamuwa et al., 2020; Khan et al., 2021; Oliveira, 2006; Partida, 2017; Pokonieczny, 2017, 2018a, 2018b; Rybansky, 2007; Wicander, 2018);
- b) verificar a potencialidade de mecanização para fins agrícolas (Höfig & Araujo-Junior, 2015);
- c) desenvolver um método para superar a dificuldade de mapeamento manual de terrenos fora de estrada (Grogan, 2009; Pokonieczny, 2020; Pundir & Garg, 2020a);
- d) discutir e analisar questões relacionadas ao desenvolvimento de mapas de trafegabilidade para Veículos Terrestres Não Tripulados (VTNT) (Pokonieczny & Rybansky, 2018);
- e) desenvolver e testar modelo baseado em SIG para prever a trafegabilidade fora de estrada no terreno (Gumos, 2005; Hofmann et al., 2014; Hua et al., 2023, 2024; Hubacek et al., 2016; Pimpa et al., 2014; Pokonieczny, 2018c, 2022; Pokonieczny & Borkowska, 2019; Pokonieczny & Dawid, 2023; Pokonieczny & Moscicka, 2018; Pokonieczny et al., 2021; Potic et al., 2024; Pundir & Garg, 2022; Rybansky et al., 2014; Rybansky et al., 2015; Sadiya et al., 2017; Suvinen, 2006);
- f) propor um sistema de auxílio à tomada de decisão baseado em regras de trafegabilidade, conhecido como Sistema Especialista (SE) (Grandjean & Angelliaume, 2009; Pundir & Garg, 2020b, 2021; Torrealba, 2015);
- g) demonstrar a possibilidade de uso de um banco de dados de solos e resultados de medições penetrométricas para fins de criação de mapas de trafegabilidade (Hubacek et al., 2014);
- h) operacionalizar o 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);
- i) demonstrar a viabilidade de uma Rede Triangular Irregular (TIN) como um meio mais eficiente e abrangente para armazenar dados de trafegabilidade do terreno (Rehrer et al., 2022);
- j) determinar a influência da qualidade dos bancos de dados florestais nos resultados das análises para posterior geração de mapas de trafegabilidade (Rada et al., 2020);
- k) desenvolver sistema de localização automática de rotas para combates militares (Pimpa, 2012); e
- l) determinar a qualidade geral dos dados, informações e métodos atuais mais frequentemente empregados na elaboração de mapas de trafegabilidade (Rada et al., 2021).

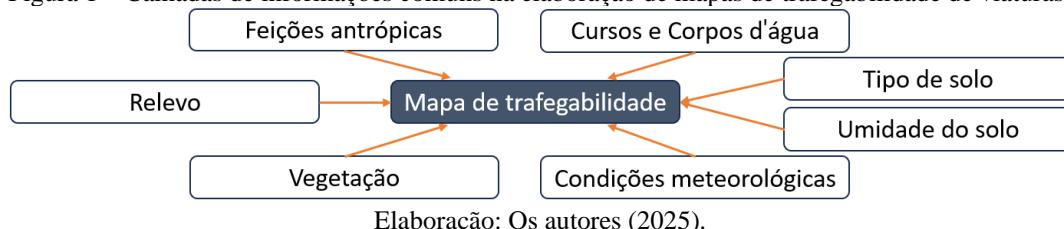
2.1 Camadas de informações

Normalmente, os fatores modelados para a elaboração dos mapas de trafegabilidade incluem, mas não estão restritos às seguintes variáveis: condições meteorológicas – precipitação e temperatura; relevo – declividade (variável de 0° a 90°); cursos e corpos d'água – rios, lagos, lagoas e demais corpos hídricos naturais ou artificiais; solo – tipo e umidade; vegetação – florestas, campos e pastagens, lavouras e demais áreas de cultivo; e feições antrópicas – construções civis, áreas edificadas, pontes, túneis e malhas viárias.

Em geral, tais variáveis são dispostas por meio de camadas de informações em um SIG (Figura 1).

Essas camadas podem ser agrupadas em dois grandes grupos: o dos fatores dinâmicos – englobam as características do solo na presença de umidade e as condições meteorológicas – 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 a eventos naturais e ao fato de a capacidade humana alterar significativamente o ambiente em que vivemos. Como exemplos, pode-se citar as obras de corte e aterro (alteração do relevo), construção de rodovias e pontes (feições antrópicas), alterações no uso e cobertura do solo (vegetação), alteração de curso de rios e construção de barragens (corpos d'água).

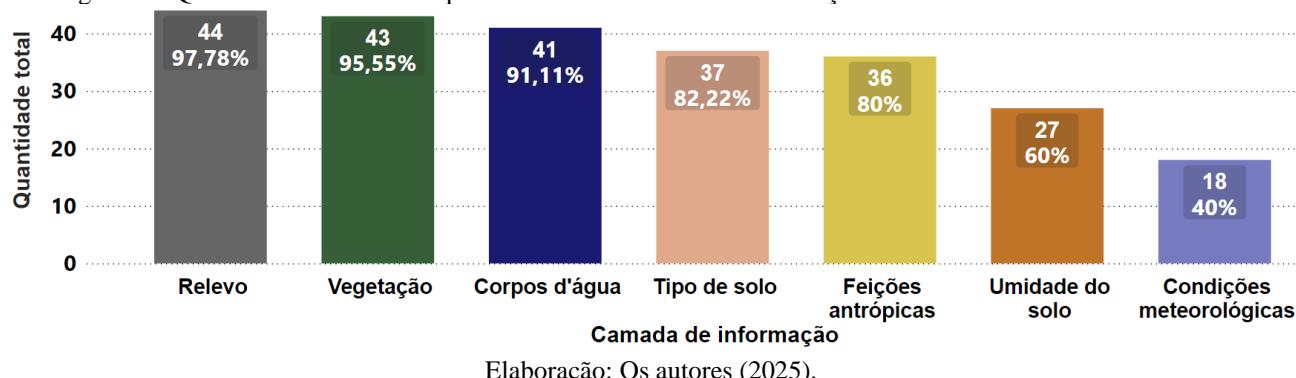
Figura 1 – Camadas de informações comuns na elaboração de mapas de trafegabilidade de viaturas.



De acordo com a disponibilidade de fontes de dados e abordagens metodológicas adotadas, os trabalhos analisados empregaram diferentes combinações de camadas de informações nas respectivas modelagens (Quadro 1). Essas camadas são capazes de fornecer as restrições ao movimento de viaturas.

Como pode ser observado na Figura 2, a camada de informação de relevo apareceu em aproximadamente 98% dos trabalhos revisados, destacando-se perante as demais camadas verificadas. As camadas de vegetação e 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 a utilização dessas camadas, quando disponíveis para análise em uma área de estudo. A utilização da camada de informação de umidade do solo em 27 dos 45 estudos revisados (60%) permite inferir que, não obstante a sua importância na definição do fenômeno analisado, não foi considerada em uma quantidade considerável de estudos sobre a temática. Por fim, as condições meteorológicas, ainda que sejam um fator de grande importância prática para a previsão da trafegabilidade de viaturas em um período específico, 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 – Quantidade de vezes em que determinada camada de informação foi utilizada na literatura analisada.



Todos os trabalhos analisados trazem a necessidade de utilização de diferentes insumos (dados) para a geração de informações que poderiam, em seus julgamentos profissionais, afetar a mobilidade de uma determinada viatura em uma dada localidade. Ressalta-se que, além das camadas de informações usualmente presentes (Figura 2), alguns autores, como Hubacek et al. (2016), ainda destacaram como importantes para avaliação da trafegabilidade: as propriedades do veículo (massa, pressão dos pneus, carga aplicada no solo, tração, dimensões, tipo de chassi (longarina ou monobloco), taxa de subida, ângulo de aproximação, altura do chassi em relação ao solo, localização do reservatório de óleo do cárter, inclinação frontal ou lateral e potência

do motor), mecanismos de rodagem específicos (tipo e quantidade de pneus), fatores técnicos (tipo e condição do veículo), 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 geográficos e geológicos, como riscos de desastres (possibilidade de desabamentos, quedas de barreiras, escorregamentos de terra e fluxos de detritos), Índice de Cone (RCI), tipo de rocha presente e altitude local.

Quadro 1 – Camadas de informações utilizadas em cada um dos estudos analisados.

Autor(es)	Relevo	Tipo de Solo	Umidade do Solo	Vegetação	Condições meteorológicas	Corpos d'água	Feições antrópicas
Flores et al. (2014)	✓	✓	✓	✓	-	✓	-
Grandjean e Angelliaume (2009)	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓
Grogan (2009)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
Gumos (2005)	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓
He et al. (2023)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Hestera e Pahernik (2018)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Höfig e Araujo-Junior (2015)	✓	✓	✓	-	-	-	-
Hofmann et al. (2014)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Hua et al. (2023)	✓	✓	-	✓	-	✓	✓
Hua et al. (2024)	✓	✓	-	✓	-	✓	✓
Hubacek et al. (2014)	-	✓	✓	-	✓	-	-
Hubacek et al. (2016)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Kalugamuwa et al. (2020)	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓
Khan et al. (2021)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Oliveira (2006)	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓
Partida (2017)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
Pimpa (2012)	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓
Pimpa et al. (2014)	✓	✓	-	✓	-	✓	✓
Pokonieczny (2017)	✓	✓	-	✓	-	✓	✓
Pokonieczny (2018a)	✓	✓	-	✓	-	✓	✓
Pokonieczny (2018b)	✓	-	-	✓	-	✓	✓
Pokonieczny (2018c)	✓	-	-	✓	-	✓	✓
Pokonieczny (2020)	✓	-	-	✓	-	✓	✓
Pokonieczny (2022)	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓
Pokonieczny e Borkowska (2019)	✓	✓	-	✓	-	✓	✓
Pokonieczny et al. (2021)	✓	-	-	✓	-	✓	✓
Pokonieczny e Dawid (2023)	✓	-	-	✓	-	✓	✓
Pokonieczny e Moscicka (2018)	✓	-	-	✓	-	✓	✓
Pokonieczny e Rybansky (2018)	✓	-	-	✓	-	✓	✓
Potic et al. (2024)	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓
Pundir e Garg (2020a)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pundir e Garg (2020b)	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓
Pundir e Garg (2021)	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓
Pundir e Garg (2022)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
Rada et al. (2020)	✓	-	-	✓	-	-	-
Rada et al. (2021)	✓	✓	-	✓	-	✓	-
Rehrer et al. (2022)	✓	✓	✓	✓	-	-	-
Rybansky (2007)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Rybansky et al. (2014)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Rybansky et al. (2015)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Sadiya et al. (2017)	✓	✓	-	✓	-	✓	✓
Suvinen (2006)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Torrealba (2015)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Veloza (2020)	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓
Wicander (2018)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Elaboração: Os autores (2025).

2.1.1 RELEVO

O principal aspecto do relevo que se procura analisar é a declividade do terreno, que possui grande impacto na mobilidade de viaturas. Essas possuem limitações para a transposição de terrenos acidentados que estejam acima de sua capacidade máxima de rampa. A camada de informação do relevo foi relatada na quase totalidade dos estudos, sendo que diferentes insumos foram utilizados em sua obtenção. A resolução espacial desses insumos deve ser levada em consideração, em especial ao se analisar a trafegabilidade de viaturas de pequenas dimensões. Quanto menor o seu tamanho, maiores as chances de não conseguir transpor obstáculos formados pelo relevo, a menos que se trate de uma viatura com preparação específica (como os *rovers*).

Observou-se a utilização de Modelos Digitais de Elevação (MDE) de caráter global em 18 dos 45 estudos analisados, com emprego do SRTM, com 90 m de resolução espacial (Höfig & Araujo-Junior, 2015; Sadiya et al., 2017) e a versão refinada, com 30 m (Grogan, 2009; Hubacek et al., 2016; Kalugamuwa et al., 2020; Pokonieczny, 2017, 2018a, 2018b, 2018c; Pokonieczny et al., 2021; Pundir & Garg, 2020b, 2021); do ALOS PALSAR, com resolução espacial de 12,5 m (Khan et al., 2021; Veloza, 2020); do ASTER (Partida, 2017; Pundir & Garg, 2020a), e sua versão derivada EU-DEM (Potic et al. 2024), ambos com resolução espacial de 30 m; e da Nuvens de Dados Geoespaciais, da China (Hua et al., 2023, 2024).

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 para a elaboração de mapas de trafegabilidade, devido principalmente à baixa resolução espacial, que pode esconder obstáculos intransponíveis para as viaturas, esses insumos globais podem se constituir no único dado disponível sobre o relevo na área de interesse, o que justifica o seu uso em 40% dos trabalhos revisados.

Outros autores obtiveram informações sobre o relevo com uso de bases cartográficas na escala 1:10.000 (Torrealba, 2015); de arquivos vetoriais oriundos de uma rede regular de 50x50 m e técnicas fotogramétricas, com precisão vertical de 2,5 m (Gumos, 2005); MDE local do Marrocos e Dados Digitais de Elevação do Terreno Nível 2 (DTED2), de 30 m de resolução espacial (Grandjean & Angelliaume, 2009); modelos de topografia na escala de 1:25.000 (DMU25), do Serviço Geográfico das Forças Armadas da República Tcheca (Hofmann et al., 2014); 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); banco de dados vetorial (VMap nível 2) na escala 1:50.000 (Pokonieczny, 2022; Pokonieczny & Moscicka, 2018; Pokonieczny & Dawid, 2023); dados do Departamento de Engenharia e Levantamento da Universidade de Chulalongkorn, da Tailândia, com resolução espacial de 30 m (Pimpa, 2012); e extração de curvas de nível de cartas topográficas (Oliveira, 2006).

Destacam-se os trabalhos que utilizaram insumos de alta qualidade, o que possibilitou a obtenção de resultados mais condizentes com a verdade de campo, como no uso do DMR5, de 1 m de resolução espacial, 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 resolução espacial de 1 m e erro altimétrico menor ou igual a 0,1 m, obtidos por tecnologia de Varredura a Laser (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 5^a geração (DEM5) da República Tcheca e Modelo Digital de Superfície (MDS) de 1^a geração (DSM1G), com 1 m de resolução espacial, obtidos por ALS (Rada et al., 2020, 2021); e MDE local Buckeye, com resolução espacial de 1 m (Rehrer et al., 2022).

A declividade do terreno pode ser classificada 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 ao movimento), ondulado (6° a 17°, restritivo), movimentado (17° a 26°, muito restritivo) e montanhoso (>26°, impeditivo). Por sua vez, Khan et al. (2021) consideram e aconselham que inclinações superiores a 30° devam ser completamente evitadas.

2.1.2 VEGETAÇÃO

A vegetação exerce forte influência sobre a trafegabilidade, tendo esta relação direta com a densidade vegetal, uma vez que, quanto mais densa, mais restritiva. Uma mata fechada, por exemplo, será um grande

obstáculo, impedindo o deslocamento com viaturas, enquanto vegetações rasteiras, de poucos centímetros de altura em relação ao solo, permitirão o deslocamento com pouca ou nenhuma restrição.

Para a obtenção de dados sobre a vegetação, os estudos realizados utilizaram-se de classificação supervisionada (Pimpa, 2012; Pimpa et al., 2014) em imagens do satélite Sentinel-2 (He et al., 2023; Khan et al., 2021) e em imagens dos satélites NigeriaSat-2 e NigeriaSat-X (Sadiya et al., 2017); classificação não supervisionada (Pundir & Garg, 2020a); Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) para diferenciação de áreas e densidades de vegetação (Pundir & Garg, 2022); imagens MODIS (Partida, 2017); vetorização manual de imagens multiespectrais (Hubacek et al., 2016); NDVI, análise por Componentes Principais e uso do classificador de Máxima Verossimilhança (MAXVER), em imagens do sensor ETM, do Landsat 7 (Oliveira, 2006); imagens do sensor OLI, do Landsat 8, com resolução espacial de 30 m (Pundir & Garg, 2020b, 2021); e ortofotos RGB, com resolução espacial de 0,25 m e 0,5 m (Wicander, 2018).

Outros autores empregaram bases vetoriais, com uso de dados na escala 1:25.000 (Pokonieczny & Rybansky, 2018) e 1:50.000 (Gumos, 2005; Pokonieczny, 2018b, 2018c, 2022; Pokonieczny & Dawid, 2023; Pokonieczny & Moscicka, 2018); dados de uso e cobertura do solo, da Agência Europeia de Meio Ambiente (EEA), em escala 1:100.000 (Pokonieczny, 2020; Pokonieczny et al., 2021; Potic et al., 2024); dados de objetos na escala de 1:10.000 (BDOT10k), do Centro de Geodésia e Cartografia da Polônia (Pokonieczny, 2018a); e dados do Banco de Dados Geográficos do Exército Brasileiro (BDGEx) (Veloza, 2020).

Uma terceira opção usada nos trabalhos analisados foram os mapas cadastrais e topográficos, em escala 1:50.000, 1:100.000 e 1:250.000 (Pokonieczny, 2017); ortofotocartas digitais 1:10.000 (Torrealba, 2015); mapas de uso e cobertura do solo do Centro Geoespacial do Exército Americano (Rehrer et al., 2022); dados LANDFIRE, do 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 do solo na escala 1:50.000 (Kalugamuwa et al., 2020).

Destacam-se alguns autores que utilizaram fontes de dados de alta qualidade para a verificação da vegetação, o que pressupõe uma maior precisão na determinação de áreas com vegetações que possam influenciar o movimento de viaturas: Rada et al. (2020), que utilizaram dados do Plano Econômico Florestal (FEP), geridos pelo Instituto de Gestão Florestal, da República Tcheca, em conjunto com imagens de drone; Rada et al. (2021), que usaram dados de levantamentos de campo e um MDS de alta resolução espacial (DSM1G); Suvinen (2006), que fez uso de cruzamento de dados de mapa topográfico e dados do Instituto Finlandês de Pesquisa Florestal; e Pokonieczny e Borkowska (2019), com emprego de um mapa em escala cadastral de 1:500, obtido junto ao Instituto Nacional de Geodésia e Cartografia da Polônia.

Como exemplo de aplicação da camada de informação de vegetação, verifica-se que Oliveira (2006) utilizou três diferentes classes de restrições ao movimento: impeditivo (conglomerado de árvores que impeçam o movimento, como o que ocorre em matas virgens ou florestas), restritivo (árvores espaçadas de tal forma a possibilitar a passagem de viaturas) e adequado (campos, pastagens e vegetação rasteira).

2.1.3 CURSOS E CORPOS D'ÁGUA

Para a obtenção dessa camada de informação, os estudos utilizaram-se de imagens do sensor HVR, do SPOT 5, com resolução espacial de 10 m (Oliveira, 2006) e do NigeriaSat-X e NigeriaSat-2 (Sadiya et al., 2017); Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) (Pundir & Garg, 2022); classificação de imagens (Pimpa et al., 2014) aplicadas em imagens do Sentinel-2 (He et al., 2023; Khan et al., 2021) e em ortofotos, com resolução espacial de 0,25 m e 0,5 m (Wicander, 2018); imagens do sensor OLI, do Landsat 8 (Partida, 2017; Pundir & Garg, 2020b, 2021); dados do RTSD, da Tailândia, na escala de 1:50.000 (Pimpa, 2012); e fotografias aéreas, na escala 1:16.000, e dados de levantamentos de campo (Suvinen, 2006).

Outros autores empregaram bases *rasters*, com uso de cartas topográficas (Pundir & Garg, 2020a, 2022) de 1:50.000, 1:100.000 e 1:250.000 (Pokonieczny, 2017) e produzidas pelo Exército Tcheco (Rybansky et al., 2015); mapas da década de 1950 (Rada et al., 2021); mapa de uso e cobertura do solo de 1:50.000 (Kalugamuwa et al., 2020) e 1:500, do Instituto Nacional de Geodésia e Cartografia da Polônia (Pokonieczny & Borkowska, 2019).

Foram também utilizadas bases vetoriais, presentes em dados de bacias hidrográficas da Suécia (Gumos, 2005); dados do SIG de Recursos Hídricos do Alto Iguaçu, Paraná, em escala 1:10.000 (Torrealba, 2015); *OpenStreetMap* (OSM) (Potic et al., 2024); banco de dados geográficos locais (Hubacek et al., 2016) em escala 1:25.000 (Pokonieczny & Rybansky, 2018) e 1:50.000 (Pokonieczny, 2018a, 2018b, 2018c, 2020, 2022; Pokonieczny et al., 2021; Pokonieczny & Dawid, 2023; Pokonieczny & Moscicka, 2018); e dados de hidrografia na escala de 1:12.000 (Grogan, 2009).

Como exemplo de aplicação dessa camada, no estudo de Oliveira (2006), verificaram-se as classes: impeditiva (cursos d'água de grande profundidade), restritiva (cursos d'água de pequena profundidade) e adequada (água acumulada, com profundidade menor que 0,6 m, em região sem correnteza).

2.1.4 SOLO

Detalhes sobre os tipos de solos de uma região podem ser obtidos a partir de mapas de solos (pedológicos) ou geológicos e, mais precisamente, por meio de levantamentos de campo. Outros meios para obtenção do tipo de solo podem ser utilizados, como o empregado por Veloza (2020), que aplicou técnicas de classificação com uso de imagens de alta resolução espacial. Por seu turno, Potic et al. (2024) fez uso de mapas pedológicos em combinação com documentos locais sobre as características do solo na Sérvia oriental.

Não obstante, o mais comum na literatura especializada é o uso de mapas pedológicos, como os obtidos em escala de 1:200.000, do Centro Europeu de Dados sobre Solos (ESDAC) (Khan et al., 2021); de depósitos quaternários de 1:50.000 (Gumos, 2005); de 1:200.000, da Diretoria de Geografia Militar da Polônia (Pokonieczny, 2017, 2018a, 2022); de 30 m de resolução espacial, do Centro Geoespacial do Exército Americano (Rehrer et al., 2022); de 1:50.000, do Serviço Geológico Tcheco, e mapa de solos 1:200.000 (desatualizado, com dados obtidos há mais de 60 anos) (Rada et al., 2021); no Sistema de Informações de Solo da China (SISChina) (Hua et al., 2023, 2024); e de levantamentos de campo, junto com mapas pedológicos (Oliveira, 2006).

Verifica-se também a possibilidade de empregar dados vetoriais 1:20.000 (Suvinen, 2006); mosaicos 1:250.000, da Direção de Geografia e Cartografia da Força Armada Venezuelana (DIGECAFAB) (Partida, 2017); 1:24.000, obtidos da Biblioteca de Dados Geográficos de Pima, dos Estados Unidos (Grogan, 2009); obtidos junto ao Departamento de Agricultura e ao Centro de Gerenciamento de Desastres, do Sri Lanka (Kalugamuwa et al., 2020); do BDOT10k (Pokonieczny & Borkowska, 2019); do RTSD, 1:50.000 (Pimpa, 2012); banco de dados com informações relacionadas às condições do solo, criado com uso de métodos de fotogrametria digital e ALS (Rybansky et al., 2015); e dados de material de superfície, do Ministério da Agricultura da Nigéria, em combinação com dados de extensão de planície inundável extraídos de imagem MODIS (Sadiya et al., 2017).

Por seu turno, a umidade do solo pode ser medida por observações de campo (necessidade de equipamentos especializados) ou por meio de SR. Os levantamentos de campo requerem muitas horas de trabalho, disponibilidade de equipamentos relativamente caros, não sendo eficiente para medições contínuas em grandes áreas. O método baseado em SR fornece uma maneira econômica de estimar continuamente a umidade do solo em grandes áreas a partir de ondas do espectro do visível, infravermelho e micro-ondas, com desvantagem de medições com menor precisão e qualidade.

Para a obtenção da umidade do solo com uso de SR, pode-se calcular, por exemplo, o Índice de Umidade do Solo (SMI), com as bandas infravermelho de ondas curtas (SWIR) e infravermelho próximo (NIR). O valor obtido é um indicador do teor de umidade presente na camada superior do solo. Pode-se, ainda, empregar o Índice Topográfico de Umidade (TWI), com uso de MDEs (HE et al., 2023); e o sistema de Umidade do Solo Ativo e Passivo (SMAP), da agência americana NASA, e a plataforma indiana MOSDAC, com informações disponíveis em resolução espacial de 1 km (Pundir & Garg, 2020a).

Alguns autores revisados optaram por métodos de verificação do tipo e umidade do solo com a inclusão de levantamentos de campo, normalmente realizadas por meio de coletas de amostras e inspeção em laboratório ou realização de medições penetrométricas. A medição do índice de cone, com penetrômetros, pode indicar diretamente a resposta do solo à trafegabilidade. Diante disso, levantamentos de campo foram realizados para a coleta de dados amostrais sobre o solo (Hubacek et al., 2014, 2016; Pundir & Garg, 2020b, 2021, 2022) com

posterior combinação com dados de solos tcheco (escala 1:50.000) e sueco (escalas 1:25.000 e 1:100.000) (Wicander, 2018).

De certa forma, alguns autores parecem optar pela adoção de um modelo simplificado para a umidade do solo, por meio de três classes: 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, 2016; Kalugamuwa et al., 2020; Khan et al., 2021; Pundir & Garg, 2020b; Rehrer et al., 2022; Torrealba, 2015; Wicander, 2018).

2.1.5 FEIÇÕES ANTRÓPICAS

As feições antrópicas compreendem as construções civis, como pontes, túneis e vias, que podem influenciar positivamente a trafegabilidade de viaturas. Para obtenção dessa camada, foram utilizadas bases *rasters*, com uso de técnicas de classificação (Pimpa et al., 2014) em imagens Landsat 8 (He et al., 2023); cartas topográficas com informação de infraestrutura local (Oliveira, 2006; Pundir & Garg, 2020a, 2020b); mapas topográficos de 1:50.000, 1:100.000 e 1:250.000 (Pokonieczny, 2017) e 1:25.000 e 1:100.000 (Hubacek et al., 2016); projeto de levantamento da Índia (Pundir & Garg, 2021); do Exército Tcheco (Rybansky et al., 2015); e ortofotos da Suécia (Wicander, 2018).

Bases vetoriais também foram empregadas, como de estradas da Finlândia, com precisão planimétrica de 1 a 3 m (Suvinen, 2006); do BDGEx (Veloza, 2020); do Departamento de Levantamentos do Sri Lanka (Kalugamuwa et al., 2020); do Departamento de Estradas (DOH), da Tailândia, 1:50.000 (Pimpa, 2012); do OSM (Pokonieczny, 2018a; Pokonieczny et al., 2021; Potic et al., 2024); VMap nível 2, 1:50.000 (Pokonieczny, 2018b, 2018c, 2020, 2022; Pokonieczny & Dawid, 2023; Pokonieczny & Moscicka, 2018) e 1:25.000 (Pokonieczny & Rybansky, 2018); e da Agência de Pesquisa e Desenvolvimento (NASRDA), da Nigéria (Sadiya et al., 2017).

2.1.6 CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS

A capacidade de mobilidade 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 o movimento, o que se conhece popularmente como “atolar”. Outro problema é a diminuição da aderência que a água cria entre o solo e os pneus/lagartas, o que também poderá restringir ou dificultar o movimento, 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 estimativa (previsão) para dada época do ano.

Pode-se operacionalizar essa camada com a utilização de previsões meteorológicas, para um determinado período do ano, por meio de séries históricas. Nesse caso, o produto cartográfico gerado será um mapa de “previsão” de trafegabilidade, que terá como desvantagem uma maior probabilidade de erro quanto à real possibilidade de tráfego no terreno, uma vez que as condições meteorológicas previstas, baseadas em parâmetros estatísticos de períodos anteriores, podem não se confirmar.

Informações meteorológicas geralmente estão disponíveis a partir de 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 pneus ou lagartas. Outros efeitos secundários para a trafegabilidade operam na influência das condições do tempo na hidrografia, já que pode haver um aumento do nível d’água em corpos hídricos, com subsequentes inundações de terras próximas.

Devido à maior complexidade em lidar com as condições meteorológicas, diferentes abordagens foram adotadas pelos autores 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 ao movimento) (Oliveira, 2006); divisão de áreas em secas, úmidas e saturadas (Khan et al., 2021); utilização de dados produzidos pelo Gabinete Geográfico e Hidrometeorológico Militar Tcheco (Hubacek et al., 2016); dados pluviométricos e de temperatura com 1 km

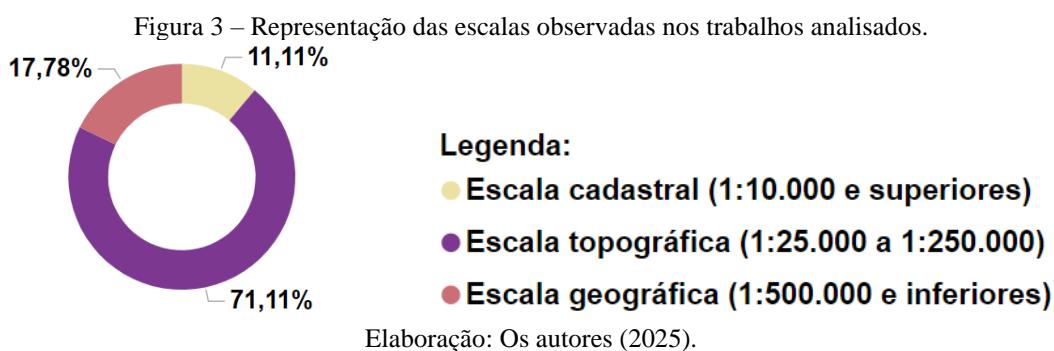
de resolução espacial, obtidos do sistema *WorldClim* (Partida, 2017) e os disponibilizados pelo Ministério do Meio Ambiente e Energia da Suécia (Wicander, 2018); além de dados do *OpenWeatherMap*, com resolução espacial de 10 km (Pokonieczny, 2022).

Uma importante observação para a utilização dessa camada de informação foi realizada pelos autores Hestera e Pahernik (2018), que aconselham utilizar previsões do tempo apenas para o curto prazo, até 72 horas de antecedência do movimento com viaturas, à medida que a precisão dessas previsões diminui em períodos mais longos. Entretanto, cabe ressaltar que nem sempre será possível adotar essa melhor prática, em especial quando houver a necessidade de elaboração de mapas de trafegabilidade para utilização em médio ou longo prazo. Nesse caso, a melhor abordagem poderá ser a previsão das 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.

2.2 Escala de trabalho

De acordo com os objetivos a serem atingidos e qualidade dos insumos utilizados, pode-se elaborar um mapa de trafegabilidade 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, o mapa produzido visa atender ao nível operacional, o que implica utilizar escalas grandes, que permitam a observação dos detalhes do terreno pelo qual ocorrerá o movimento.

Como pode ser observado na Figura 3, o grupo de escala de preferência para a elaboração dos mapas de trafegabilidade é o de escalas médias, também conhecidas como escalas topográficas (1:25.000 a 1:250.000), que estiveram presentes em quase três quartos dos trabalhos consultados. As escalas grandes (escalas cadastrais), que compreendem escalas de 1:10.000 ou superior, foram exploradas em apenas cinco dos 45 trabalhos revisados (abaixo de 12%), o que demonstra uma menor preocupação dos autores com a elaboração de trabalhos voltados para os usuários do nível operacional, normalmente motoristas. Outros fatores-chave para a menor disposição dos autores a utilizarem esse tipo de escala está atrelado à carência de insumos de alta qualidade em determinadas áreas, como MDEs de alta resolução espacial, ou o alto custo para obtê-los, o que pode inviabilizar a produção nessas escalas.



Nessa análise (Figura 3), seriam mais de 88% (somados os trabalhos realizados 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).

2.3 Softwares e equipamentos

Foram utilizados, na elaboração de cada um dos estudos, os softwares e equipamentos dispostos no Quadro 2. 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 precisão as características do solo. Quanto aos softwares, houve uma grande inclinação à utilização do ArcGIS, tendo sido usado em metade dos estudos. O

QGIS, por sua vez, foi empregado em somente dois trabalhos. Ressalta-se, porém, que a falta de divulgação dos *softwares* utilizados para processamento dos dados em 21 dos 45 estudos impediu a obtenção de informações conclusivas sobre as preferências dos autores no emprego de diferentes SIGs.

Quadro 2 – *Softwares* e equipamentos utilizados nos estudos analisados.

<i>Softwares</i>	Equipamentos	Autor(es)
Não divulgado		Flores et al. (2014); Grandjean e Angelliaume (2009); Grogan (2009); Pokonieczny (2018a, 2018c); Pokonieczny et al. (2021); Pokonieczny e Dawid (2023); Pokonieczny e Rybansky (2018); Potic et al. (2024); Pundir e Garg (2020a); Rada et al. (2021); Rehrer et al. (2022); Rybansky (2007); e Rybansky et al. (2014)
ArcGIS Desktop 9.0	GPS	Gumos (2005)
Não divulgado	Penetrômetro	He et al. (2023); Hestera e Pahernik (2018); e Hubacek et al. (2016)
ArcGIS	Não divulgado	Höfig e Araujo-Junior (2015); Hofmann et al. (2014); Hua et al. (2023, 2024); Kalugamuwa et al. (2020); Partida (2017); Pimpa et al. (2014); e Sadiya et al. (2017)
	Penetrômetro	Hubacek et al. (2014); e Wicander (2018)
ArcMap 10.3 e ArcGIS	Não divulgado	Khan et al. (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, 2022)
ArcMap 10.5		Pokonieczny e Borkowska (2019)
Não divulgado	GNSS	Pokonieczny e Moscicka (2018)
ERDAS IMAGINE e ArcGIS	Não divulgado	Pundir e Garg (2020b)
	Penetrômetro e medidor de umidade digital	Pundir e Garg (2021)
ERDAS IMAGINE e SIG não especificado	Penetrômetro	Pundir e Garg (2022)
ArcGIS	Drone DJI Phantom 3	Rada et al. (2020)
	Penetrômetro, GNSS	Rybansky et al. (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), GNSS	Veloza (2020)

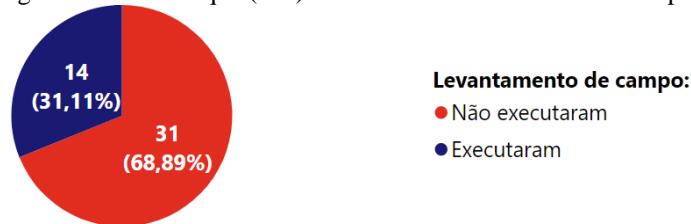
Elaboração: Os autores (2025).

2.4 Levantamentos de campo

Foi observado que alguns autores realizaram levantamentos de campo para a coleta de pontos amostrais (Pundir & Garg, 2020b) com receptores de navegação (Gumos, 2005; Oliveira, 2006; Pokonieczny & Moscicka, 2018; Rybansky et al., 2015; Suvinen, 2006; Veloza, 2020); verificação dos resultados do modelo no terreno (Hofmann et al., 2014); testes de usabilidade com os usuários previstos para o mapa elaborado (Pokonieczny, 2018b); análise do solo (He et al., 2023; Hestera & Pahernik, 2018; Hubacek et al., 2014, 2016; Pundir & Garg, 2021, 2022; Rybansky et al., 2015; Wicander, 2018); e obtenção de imagens de altíssima resolução espacial, com emprego de drones (Rada et al., 2020; Veloza, 2020).

Também foram realizados levantamentos de campo para teste da trafegabilidade de viaturas militares (Hubacek et al., 2016) por meio de cálculos do impacto dos fatores geográficos na mobilidade (Rybansky et al., 2014, 2015); e testes para validação do modelo de trafegabilidade de tratores agrícolas (Suvinen, 2006). Como se pode observar na Figura 4, menos de 32% dos estudos analisados realizaram levantamentos de campo para a validação dos mapas de trafegabilidade ou para a coleta de informações na área de interesse, o que indica que mais de dois terços dos estudos (68,89%) carecem de um viés prático e de validação, estando ligados à modelagem teórica do fenômeno da trafegabilidade.

Figura 4 – Estudos que (não) realizaram levantamentos de campo.

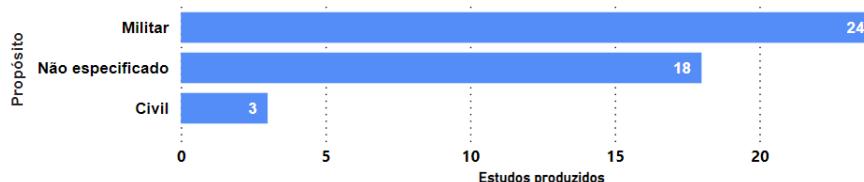


Elaboração: Os autores (2025).

2.5 Área de aplicação

Constatou-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, o que pode ser observado na Figura 5. Por conseguinte, infere-se um grande interesse da comunidade acadêmica em publicações sobre mapas de trafegabilidade voltados para a área bélica. Não obstante, não se pôde afirmar que haja um maior interesse dos pesquisadores em produzir métodos sobre a trafegabilidade (objeto de estudo que engloba os mapas de trafegabilidade) voltados à área militar, uma vez que a pesquisa bibliográfica realizada se utilizou de termos-chaves que restringiram e conduziram aos artigos revisados de interesse.

Figura 5 – Áreas de aplicação dos mapas de trafegabilidade nos estudos analisados.



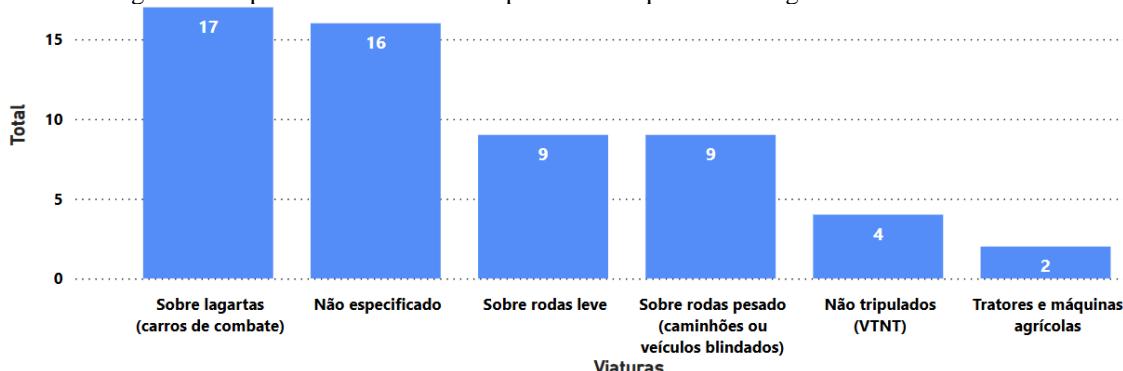
Elaboração: Os autores (2025).

2.6 Tipos de viaturas analisadas

Quanto às viaturas analisadas, foram citadas na literatura revisada um total de 57, sendo 41 específicas e 16 não especificadas. Era de se esperar, em vista da maior parte dos trabalhos voltados para a área bélica, que as viaturas escolhidas para elaboração dos mapas de trafegabilidade fossem militares, o que pode ser constatado na Figura 6. A maioria dessas viaturas foram as sobre lagartas (17 unidades, perfazendo 30% do total), que possuem maior capacidade fora de estrada, devido à presença das esteiras rolantes sobre as rodas, o que aumenta a superfície de contato e aderência com o solo.

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 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, nesses tipos de veículos.

Figura 6 – Tipo de viaturas adotadas para análise quanto à trafegabilidade no terreno.



Elaboração: Os autores (2025).

2.7 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 3.

Quadro 3 – Métodos de inferência espacial empregados para a integração de diferentes camadas de informações.

Autor(es)	Método
Flores et al. (2014)	Simulação de Monte Carlo; filtro de Kalman.
Grandjean e Angelliaume (2009)	Sistema de tomada de decisão ECORS
Gumos (2005) ¹ ; He et al. (2023) ¹ ; Khan et al. (2021) ¹ ; e Potic et al. (2024) ²	Análise de Decisão Multicritério (<i>Multicriteria Decision Analysis – MCDA</i>), pelo Processo Hierárquico Analítico (<i>Analytic Hierarchy Process – AHP</i>) ¹ ou Análise de Sobreposição Ponderada (<i>Weighted Overlay Analysis – WOA</i>) ² .
Hestera e Pahernik (2018) ³ ; Höfig e Araujo-Junior (2015) ³ ; Kalugamuwa et al. (2020) ³ ; Pimpa (2012) ⁴ ; Pimpa et al. (2014) ⁴ ; Rehrer et al. (2022) ⁴ ; e Rada et al. (2020) ⁵	Álgebra de mapas: soma e reclassificação ³ ; multiplicação de fatores calculados a partir de camadas de informação ⁴ ; e aplicação de fórmula matemática e posterior reclassificação ⁵ .
Hofmann et al. (2014); e Hubacek et al. (2014, 2016)	Lógica Fuzzy.
Hua et al. (2023, 2024); e Pokonieczny (2018c)	Rede Neural Artificial (do tipo <i>Multilayer Perceptron – MLP</i>).
Partida (2017)	Sistema Baseado em Regras (SBR); e álgebra de mapas (multiplicação dos valores das células das camadas de informação).
Pundir e Garg (2020b); Suvinen (2006); e Torrealba (2015)	Sistema Baseado em Regras (SBR).
Pokonieczny et al. (2021); e Pokonieczny e Dawid (2023)	Rede Neural Artificial (do tipo MLP); Índice de Trafegabilidade (<i>Index of Passability – IOP</i>); e MCDA.
Grogan (2009) ⁶ ; Pokonieczny e Borkowska (2019) ⁷ ; Pokonieczny (2017, 2018a, 2018b, 2020, 2022) ⁷ ; Pokonieczny e Moscicka (2018) ⁷ ; Pokonieczny e Rybansky (2018) ⁷ ; Pundir e Garg (2020a) ⁸ ; Rybansky et al. (2014, 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 informações; e posterior soma ponderada desses valores para cada célula.
Pundir e Garg (2021, 2022)	Régressão espacial.
Rada et al. (2021); e Rybansky (2007)	Análise comparativa com valores padronizados na literatura especializada.
Sadiya et al. (2017); Oliveira (2006); e Veloza (2020)	Reclassificação e sobreposição ponderada das camadas de informação.

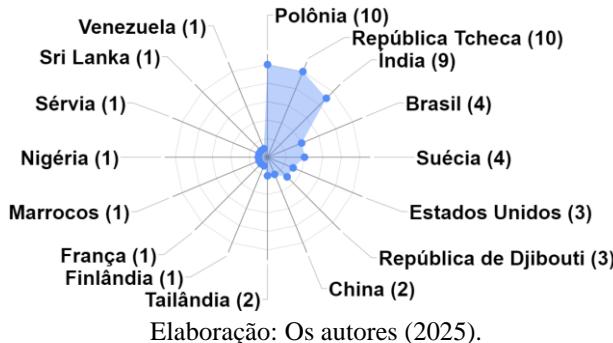
Elaboração: Os autores (2025).

2.8 Áreas de estudo

No Brasil, as áreas de estudo dos trabalhos revisados se deram em Formosa, Goiás (Oliveira, 2006); área de cultivo de café (Höfig & Araujo-Junior, 2015); porção da Bacia do Alto Iguaçu, em Araucária, Paraná (Torrealba, 2015); e Rosário do Sul, Rio Grande do Sul (Veloza, 2020). Na América Latina, foi verificada uma área de estudo no Lago de Maracaibo, Venezuela (Partida, 2017).

Na Figura 7, é possível observar o quantitativo de áreas de estudo por país. 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 estudos para elaboração dos mapas de trafegabilidade no Brasil.

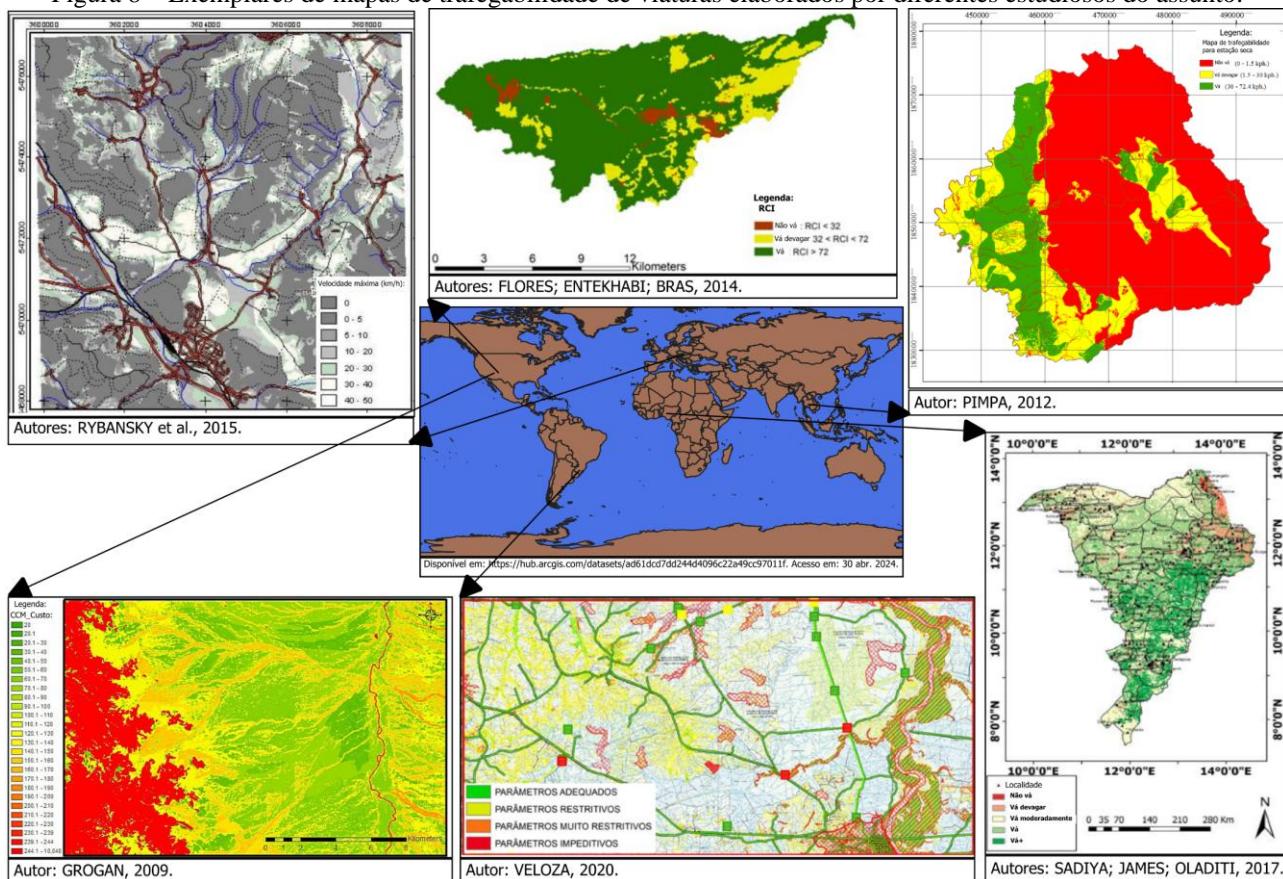
Figura 7 – Quantitativo de trabalhos sobre a temática desenvolvidos em diferentes países.



2.9 Formas de apresentação de restrições à mobilidade

Os mapas de trafegabilidade finais elaborados pelos autores foram classificados com uso de diferentes variáveis visuais. Exemplares desses produtos cartográficos podem ser visualizados na Figura 8.

Figura 8 – Exemplares de mapas de trafegabilidade de viaturas elaborados por diferentes estudiosos do assunto.



Elaboração: Adaptado de Flores et al. (2014), Grogan (2009), Pimpa (2012), Rybansky et al. (2015), Sadiya et al. (2017) e Veloza (2020).

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); em três níveis básicos, *vá* (*go*), *vá devagar* (*slow go*) e *não vá* (*no go*) (Flores et al., 2014; Grandjean & Angelliaume, 2009; Hofmann et al., 2014; Kalugamuwa et al., 2020; Pimpa, 2012; Pimpa et al., 2014; Pokonieczny & Borkowska, 2019; Pokonieczny & Dawid, 2023; Rada et al., 2020, 2021; Rybansky, 2007; Wicander, 2018); *bom* (*good*), *restrito* (*restricted*) e *difícil* (*difficult*) (Pundir & Garg, 2020b); e *terreno impeditivo* (totalmente desfavorável), *terreno restritivo* (limitativo, com velocidade reduzida) e *terreno adequado* (sem limitações observáveis) (Oliveira, 2006).

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 et al., 2021); e ótima, adequada, restritiva, muito restritiva e impeditiva (Partida, 2017); de nove 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); e dez classes, em intervalos discretos de 1 a 10 (Pokonieczny, 2018b).

Outros autores optaram por utilizar uma classificação em intervalos contínuos, com a premissa de que a transição entre classes não ocorre abruptamente em ambiente natural, havendo uma zona de transição entre classes. Realizou-se a classificação por meio de graduação de cores, sendo 1 o terreno transitável (*go terrain*), decrescendo até 0, correspondente ao terreno intransponível (*no go terrain*) (Pokonieczny, 2017, 2018a, 2018c, 2020, 2022; Pokonieczny & Moscicka, 2018; Pokonieczny et al., 2021; Pokonieczny & Rybansky, 2018); de paleta de cores, variável de acordo com a velocidade de tráfego, entre 0 e 50 km/h (Hua et al., 2023; Rybansky et al., 2014, 2015), 0 e 40 km/h (Hua et al., 2024), e conforme a possível velocidade em km/h, sendo ≤ 3 (intransitável), 3-10 (restrito), 10-30 (lento), 30-55 (passável) e 55-110 (velocidade máxima) (Rehrer et al., 2022).

Também, verificaram-se estudos que optaram por uma abordagem mista, com classes discretas e contínuas, em legenda graduada de 0,01 (menor restrição) até 2,25 (maior restrição), bem como mapeando-se áreas impeditivas (*no go*) (Gumos, 2005); cinco classes numeradas de um a cinco, em que um representa os locais de trafegabilidade mais lentos e cinco 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 et al., 2017); e com emprego de um degradê de cores, da menor restrição para a maior, utilizando-se 26 diferentes classes (Grogan, 2009). Na agricultura, os mapas de trafegabilidade podem ser traduzidos como mapas de potencialidade à mecanização, com uso de quatro classes para a mobilidade de máquinas agrícolas: extremamente apta, muito apta, apta e não recomendada (Höfig & Araujo-Junior, 2015).

3 SÍNTESE DA REVISÃO

A avaliação da trafegabilidade é fundamentada na análise da interação entre a viatura e o terreno. A viabilidade de uma viatura mover-se em terrenos é limitada e afetada por diversos fatores, entre eles a sua morfologia, particularidades e características, presença de obstáculos naturais, feições construídas pelo homem e condições climáticas. Os métodos de avaliação de trafegabilidade com emprego de SR e SIG e apresentação de informação em mapas de trafegabilidade de viaturas representam instrumentos robustos para o planejamento e tomada de decisão, o que pode representar menores contratemplos, como não se conseguir atingir o destino, problemas de atolamento no deslocamento ou acidentes, com riscos de perdas materiais ou humanas.

Para atingir seus objetivos, os autores procuraram elaborar seus respectivos mapas de forma a transmitir aos usuários, por meio de legendas específicas, a real condição do terreno em restringir o movimento. Para tanto, alguns dados essenciais foram manipulados, de modo a se obterem as camadas de informação. Por meio dessas camadas, sistematicamente combinadas – por “simples” sobreposição ou por processos mais robustos, como a utilização de algoritmos de Inteligência Artificial (IA) – em SIGs, pode-se chegar aos mapas de trafegabilidade.

Há dois grupos heterogêneos que podem se beneficiar da utilização dos mapas de trafegabilidade: os militares (Forças Armadas e auxiliares) e os civis (englobando tanto entidades públicas quanto privadas). Entre as diferenças desses grupos, destaca-se na esfera militar ser necessária a verificação rápida da trafegabilidade durante as ações militares de defesa do território nacional. Nos treinamentos, em que se prioriza a segurança dos agentes militares e dos equipamentos, espera-se que haja um maior detalhamento da mobilidade no terreno.

No grupo civil, normalmente há uma escolha natural, por parte dos agentes, em utilizar as vias construídas. Contudo, em situações adversas, pode haver a necessidade de realizar movimentos fora de estrada para se chegar ao destino. Nesses casos, assim como para o grupo dos militares, é esperado que haja um planejamento do movimento a ser realizado, que será tão melhor quanto forem os meios disponíveis com informações sobre o terreno, possibilitando uma melhor tomada de decisão. Conforme verificado nos estudos

analisados, isso pode ser operacionalizado por meio dos mapas de trafegabilidade.

Os resultados desta revisão da literatura especializada permitiram verificar que a elaboração dos mapas de trafegabilidade envolve o uso de conhecimentos multidisciplinares, essenciais para a compreensão do impacto do ambiente geográfico na mobilidade de viaturas. Em especial, destacam-se as áreas de domínio da Geografia, Ciência e Engenharia dos Solos, Hidrologia, Meteorologia, Mecânica de Automóveis, Pedologia, Cartografia e SR, o que torna os problemas relacionados à trafegabilidade fora de estrada de difícil modelagem. Somado a isso, percebe-se uma carência de métodos automatizados prontos para a análise da trafegabilidade. Entretanto, com emprego de informações obtidas de insumos de solo, relevo, vegetação, feições antrópicas, condições meteorológicas e cursos e corpos d'água, pode-se modelar a trafegabilidade de viaturas e torná-la um pouco menos complexa.

A precisão da definição das restrições ao movimento de viaturas, isto é, quanto o produto cartográfico elaborado será capaz de representar e modelar corretamente a superfície real do terreno quanto à trafegabilidade, mostrou-se dependente da suficiência e adequação dos insumos disponíveis, bem como do método de inferência espacial empregado por cada um dos autores.

Uma das principais dificuldades encontradas nos estudos analisados está na camada de informação de solos. Isso se deve à dinâmica desse elemento, que sofre forte influência das condições meteorológicas, tornando-se necessário um exame mais cuidadoso, muitas vezes com levantamentos de campo. Entretanto, nem sempre será possível realizá-los, devido à limitação de recursos financeiros e tempo disponíveis. Por exemplo, um dos métodos mais precisos atualmente para determinação de informações fidedignas desse elemento é a coleta de amostras (poços de solo), com posterior estudo laboratorial, porém esse método é relativamente caro, demorado e nem sempre é possível realizá-lo nas áreas de interesse.

Um segundo método, um pouco menos preciso, porém de maior eficiência, é o uso de medições penetrométricas, com emprego de penetrômetro e posterior comparação dos valores encontrados com valores tabelados em manuais pedológicos de referência. O problema na aplicação desse método é semelhante ao dos poços de solo, pois necessitam de ida à campo e realização de medições, gerando 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, conforme verificado nos trabalhos revisados, por meio de análise de imagens multiespectrais, combinados com o uso de diferentes fontes de dados de órgãos governamentais e produtos cartográficos diversos, como os mapas de solo e índices espectrais.

Por fim, neste estudo, foi possível verificar que o estado da arte na elaboração de mapas de trafegabilidade encontra-se no pré-processamento em SIG de insumos de SR influentes no fenômeno da trafegabilidade, de modo a obter as camadas de informação. Em um segundo momento, essas camadas devem ser integradas por meio de métodos de inferência espacial, fontes de diversos estudos nos últimos 20 anos. Atualmente, verifica-se uma tendência para a aplicação de métodos ligados à IA, que permitem essa integração de camadas de informação por meio de abordagens robustas validadas pela literatura científica.

4 RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Como consequência do que foi analisado e exposto neste trabalho de revisão da literatura, estes autores sugerem novos estudos com emprego de métodos de inferência espacial baseados em IA, que utilizem algoritmos de Aprendizado de Máquina no processo. Por exemplo, algoritmos como a Máquina de Vetores de Suporte e a Floresta Aleatória poderiam ser adaptados e automatizados para a integração das camadas, visando à melhor definição de áreas de restrições à trafegabilidade de viaturas. Também, estes autores sugerem que sejam escolhidas áreas de estudo em território brasileiro, com vistas a testar os insumos disponibilizados pelos órgãos governamentais e desenvolver métodos próprios para a elaboração de mapas de trafegabilidade que lidem com as especificidades dos fatores modeladores da trafegabilidade presentes no Brasil. Pode-se, ainda, considerar soluções de realidade aumentada para integração desses mapas com informações obtidas em tempo real no deslocamento fora de estrada.

Pesquisas futuras podem se concentrar na introdução de novos métodos de inferência espacial (Rada et al., 2021), na verificação de quais informações são suficientes para encurtar o processo de tomada de decisão e na análise de usabilidade dos mapas de trafegabilidade junto a novos usuários (Wicander, 2018). A partir do

desenvolvimento desses mapas, pode-se automatizar rotas para VTNTs, com implementação de algoritmos roteadores de menor custo, adaptando-se, por exemplo, o algoritmo de Dijkstra original ou a sua versão modificada, conhecida como A* (Pokonieczny & Borkowska, 2019), e realizar testes de trafegabilidade fora de estrada com viaturas comuns de mercado para validar a confiabilidade dos mapas elaborados em aplicações práticas (Hua et al., 2023).

Por fim, os autores revisados recomendam a inclusão de novas variáveis para a modelagem da trafegabilidade, tais como as que permitem obter informações mais precisas sobre os solos (Pokonieczny, 2022), como as que operem sobre a resistência ao rolamento de acordo com o tipo de rodado empregado na viatura (Khan et al., 2021). Nessa linha, visualiza-se o desenvolvimento de aplicações *web* e *mobile* para mapas de trafegabilidade dinâmicos, em que sejam incluídas as previsões de curtos prazo das condições meteorológicas (Hubacek et al., 2014), com preferência para a incorporação de variáveis climáticas de forma automática (Torrealba, 2015), bem como sejam consideradas as mudanças nas características do terreno ocasionadas pelas diferentes configurações dessas variáveis (Pundir & Garg, 2022).

Agradecimentos

Agradecemos ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (PPGCG) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) pela estrutura fornecida aos autores e à Diretoria de Serviço Geográfico (DSG) pela liberação do primeiro autor para a realização do curso de Mestrado. Agradecemos aos fomentadores Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) Proc. n.º 311324/2021-5 e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) Proc. n.º 2020/09215-3.

Contribuição dos Autores

Renan Fabres Dalmonech: Conceptualização, Curadoria dos dados, Análise Formal e Edição; Cláudia Maria de Almeida: Metodologia, Supervisão e Revisão; Joel Borges dos Passos: Conceptualização e Curadoria dos dados; e Rodrigo de Campos Macedo: Metodologia, Supervisão e Revisão.

Conflitos de Interesse

Os autores informam que não há conflitos de interesse.

Referências

- Flores, A. N., Entekhabi, D. & Bras, R. L. (2014). Application of a hillslope-scale soil moisture data assimilation system to military trafficability assessment. *Journal of Terramechanics*, v. 51, p. 53-66. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2013.11.004>.
- Grandjean, G. & Angelliaume, S. (2009, 17 de agosto). *The ECORS system: A mobility decision-making tool based on Earth observation data*. In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Cape Town, South Africa: p. 350-355. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2009.5417657>.
- Grogan, A. (2009). *Creating a spatial analysis model for generating composite cost surfaces to depict cross country mobility in natural terrain*. In: ASPRS/MAPPS Fall Conference. San Antonio, Texas. <https://www.semanticscholar.org/paper/CREATING-A-SPATIAL-ANALYSIS-MODEL-FOR-GENERATING-TO-Grogan/1f952330ce338719a050eba590d538e0dea03f2a>.
- Gumos, A. K. (2005). *Modelling the Cross-Country Trafficability with Geographical Information Systems*. [Independent thesis advanced level, Linköping University, Department of Computer and Information Science]. <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-313>.
- He, K., Dong, Y., Han, W. & Zhang, Z. (2023). An assessment on the off-road trafficability using a quantitative rule method with geographical and geological data. *Computers & Geosciences*, v. 177. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2023.105355>.

- Hestera, H. & Pahernik, M. (2018). Physical-geographic factors of terrain trafficability of military vehicles according to Western World methodologies. *Croatian Geographical Bulletin*, v. 80, p. 5-31. <https://doi.org/10.21861/HGG.2018.80.02.01>.
- Höfig, P. & Araujo-Junior, C. F. (2015). Classes de declividade do terreno e potencial para mecanização no estado do Paraná. *Coffee Science*, 10(2), p. 195-203. <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/8117>.
- Hofmann, A., Kovarik, V., Talhofer, V. & Hošková-Mayerová, S. (2014). Creation of models for calculation of coefficients of terrain passability. *Quality and Quantity*, v. 49, p. 1-13. <https://doi.org/10.1007/s11135-014-0072-1>.
- Hua, C., Jiang, C., Niu, R., Fu, X., Chen, Z., Kuang, X. & Yu, B. (2024). Double Neural Networks Enhanced Global Mobility Prediction Model for Unmanned Ground Vehicles in Off-road Environments. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 73(6), p. 7547-7560. <https://doi.org/10.1109/TVT.2024.3351677>.
- Hua, C., Niu, R., Jiang, C., Yu, B., Zhu, H. & Li, B. (2023). Efficient and High-Fidelity Mobility Prediction for Unmanned Ground Vehicles Based on Gaussian Sampled Terrain and Enhanced Neural Network. *IEEE Robot. Autom. Lett.*, 8(12), p. 8422-8429. <https://doi.org/10.1109/lra.2023.3329349>.
- Hubacek, M., Kovarik, V., Talhofer, V., Rybansky, M., Hofmann, A., Břeňová, M. & Čeplová, L. (2016, 1º de janeiro). *Modelling of geographic and meteorological effects on vehicle movement in the open terrain*. In: 23rd Central European Conference. Brno, Czech Republic. https://www.researchgate.net/publication/307877346_MODELLING_OF_GEOGRAPHIC_AND_METEOROLOGICAL_EFFECTS_ON_VEHICLE_MOVEMENT_IN_THE_OPEN_TERRAIN.
- Hubacek, M., Rybansky, M., Brenova, M. & Ceplova, L. (2014). *The soil trafficability measurement in the Czech Republic for military and civil use*. In: 18th International Conference of the ISTVS. Seoul, Korea: p. 22-25. https://www.researchgate.net/publication/268818255_The_soil_trafficability_measurement_in_the_czech_republic_for_military_and_civil_use.
- Kalugamuwa, K., Dinusha, K. A. & Sandamali, K. U. J. (2020, outubro). *GIS Mechanism For Terrain Trafficability*. In: 13th International Research Conference. Lavinia. Sri Lanka: General Sir John Kotelawala Defence University. <http://ir.kdu.ac.lk/handle/345/3280>.
- Khan, M., Kashif, M. & Shah, A. (2021). Off-Road Trafficability for Military Operations Using Multi-Criteria Decision Analysis. *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, v. 10, p. 3425-3437. <https://doi.org/10.23953/cloud.ijarsg.489>.
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J. & Altman, D. G. (2009). Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *BMJ*, p. 1-8. <https://doi.org/10.1136/bmj.b2535>.
- Oliveira, I. C. (2006). *O uso da análise espacial no processo de integração terreno, condições meteorológicas e inimigo (PITCI) do Exército brasileiro*. [Dissertação de Mestrado em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília (UnB), Brasília, DF]. https://www.researchgate.net/publication/40437463_O_uso_da_analise_espacial_no_processo_de_integracao_terreno_condicoes_meteorologicas_e_inimigo_PI_TCI_do_exercito_brasileiro.
- Partida, R. D. L. (2017). *Geotecnologias e análise espacial: planejamento de mobilidade com unidades blindadas tipo lagarta na bacia hidrográfica do lago de Maracaibo - Venezuela*. [Dissertação de Mestrado em Geografia, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, Rio Grande do Sul]. <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/14417>.
- Pimpa, W. (2012). *Terrain analysis for path finding of combat cross-country movement*. [Doctoral Thesis in Philosophy and Geoinformatics, School of Remote Sensing, Institute of Science, Suranaree University of Technology, Thailand]. <http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/handle/123456789/4972>.
- Pimpa, W., Sarapirome, S. & Dasananda, S. (2014). GIS application to development of military cross-country movement maps at Mae Sot district, western Thailand. *Suranaree Journal of Science and Technology*, 21(3), p. 215-232. <https://doi.org/10.14456/sjst.2014.26>.
- Pokonieczny, K. (2017, 1º de maio). *Automatic military passability map generation system*. In: International Conference on Military Technologies (ICMT). Brno, Czech Republic: p. 285-292.

- [https://doi.org/10.1109/MILTECHS.2017.7988771.](https://doi.org/10.1109/MILTECHS.2017.7988771)
- Pokonieczny, K. (2018a). Comparison of land passability maps created with use of different spatial data bases. *Geografie*, 123(3), p. 317-352. <https://doi.org/10.37040/geografie2018123030317>.
- Pokonieczny, K. (2018b, junho). *Methodology of cartographic visualisation of military maps of passability*. In: 7th International Conference on Cartography and GIS. Sozopol, Bulgaria: p. 613-622. https://www.researchgate.net/publication/330534058_Methodology_of_cartographic_visualisation_of_military_maps_of_passability.
- Pokonieczny, K. (2018c). Use of a Multilayer Perceptron to Automate Terrain Assessment for the Needs of the Armed Forces. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(11). <https://doi.org/10.3390/ijgi7110430>.
- Pokonieczny, K. (2020). The Methodology of Creating Variable Resolution Maps Based on the Example of Passability Maps. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(12). <https://doi.org/10.3390/ijgi9120738>.
- Pokonieczny, K. (2022). *Methodology of developing the dynamic maps of passability*. In: 8th International Conference on Cartography and GIS. Nessebar, Bulgaria: v. 2, p. 244-252. https://www.researchgate.net/publication/368364984_METHODODOLOGY_OF_DEVELOPING_THE_DYNAMIC_MAPS_OF_PASSABILITY.
- Pokonieczny, K. & Borkowska, S. (2019, 1º de maio). *Using High Resolution Spatial Data to Develop Military Maps of Passability*. In: International Conference on Military Technologies (ICMT). Brno, Czech Republic: p. 1-8. <https://doi.org/10.1109/MILTECHS.2019.8870022>.
- Pokonieczny, K. & Dawid, W. (2023). The application of artificial neural networks for the generalisation of military passability maps. *International Journal of Cartography*, 9(3), p. 638-654. <https://doi.org/10.1080/23729333.2023.2231589>.
- Pokonieczny, K., Dawid, W. & Borkowska, S. (2021). *Comparison of the military maps of trafficability developed by different methods*. In: International Conference on Military Technologies (ICMT). Brno, Czech Republic, p. 1-8. <https://doi.org/10.1109/ICMT52455.2021.9502833>.
- Pokonieczny, K. & Moscicka, A. (2018). 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. <https://doi.org/10.3390/ijgi7070261>.
- Pokonieczny, K. & Rybansky, M. (2018). Method of developing the maps of passability for unmanned ground vehicles. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 169(1), p. 1-9. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/169/1/012027>.
- Potic, I., Stojanovic, M., Curcic, N., Dordevic, D. & Bankovic, R. (2024). Development of geospatial passability maps: a multicriteria analysis approach. *Journal of the Geographical Institute Jovan Cvijic*, 74(1), p. 29-45. <https://doi.org/10.2298/IJGI230822002P>.
- Pundir, S. K. & Garg, R. D. (2020a). Development of mapping techniques for off road trafficability to support military operation. *Spatial Information Research*, 28(4), p. 495-506. <https://doi.org/10.1007/s41324-019-00310-z>.
- Pundir, S. K. & Garg, R. D. (2020b). Development of rule-based approach for assessment of off-road trafficability using remote sensing and ancillary data. *Quaternary International*, v. 5, p. 575-584. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.07.017>.
- Pundir, S. K. & Garg, R. D. (2021). Development of an empirical relation to assess soil spatial variability for off-road trafficability using terrain similarity analysis & geospatial data. *Remote Sensing Letters*, 12(3), p. 259-268. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2021.1880657>.
- Pundir, S. K. & Garg, R. D. (2022). 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. <https://doi.org/10.1016/j.qsa.2021.100042>.
- Rada, J., Rybansky, M. & Dohnal, F. (2020). Influence of Quality of Remote Sensing Data on Vegetation

- Passability by Terrain Vehicles. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/ijgi9110684>.
- Rada, J., Rybansky, M. & Dohnal, F. (2021). The Impact of the Accuracy of Terrain Surface Data on the Navigation of Off-Road Vehicles. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(3), p. 106-124. <https://doi.org/10.3390/ijgi10030106>.
- Rehrer, S. E., Griffin, A. W. & Renner, M. (2022). *Cross country mobility (CCM) modeling using triangulated irregular networks (TIN)*. United States: Engineer Research and Development Center. Technical Report ERDC/GRL TR-22-5. <https://erdc-library.erdc.dren.mil/jspui/handle/11681/46082>.
- Rybansky, M. (2007). *Effect of the Geographic Factors on the Cross-Country Movement during Military Operations and the Natural Disasters*. In: Cartographic Renaissance. Brno, Czech Republic. <https://www.semanticscholar.org/paper/Effect-of-the-Geographic-Factors-on-the-Cross-and-Rybansky/823e70ccf260cdc2336956935e11a9c79100107d>.
- Rybansky, M., Hofmann, A., Hubacek, M., Kovarik, V. & Talhofer, V. (2015). Modelling of cross-country transport in raster format. *Environmental Earth Sciences*, 74(10), p. 7049-7058. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4759-y>.
- Rybansky, M., Hubacek, M., Hofmann, A., Kovarik, V. & Talhofer, V. (2014, 1º de janeiro). *The Impact of Terrain on Cross-Country Mobility – Geographic Factors and their Characteristics*. In: 18th International Conference of the ISTVS. Seoul, Korea. https://www.researchgate.net/publication/276847750_The_Impact_of_Terrain_on_Cross-Country_Mobility_-_Geographic_Factors_and_their_Characteristics.
- Sadiya, T. B., James, G. K. & Oladiti, I. (2017). Military Terrain Trafficability Analysis for North-East Nigeria: A GIS and Remote Sensing-Based Approach. *IOSR Journal of Mobile Computing & Application*, 4(1), p. 34-46. <https://doi.org/10.9790/0050-04013446>.
- Suvinen, A. (2006). A GIS-based simulation model for terrain tractability. *Journal of Terramechanics*, v. 43, p. 427-449. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2005.05.002>.
- Torrealba, Y. V. (2015). *Mapa de transitabilidade para operações táticas com auxílio de SIG e sistema especialista*. [Dissertação de Mestrado em Ciências Geodésicas, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, Paraná]. <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/40826>.
- Veloza, E. V. (2020). *O emprego da Geointeligência como ferramenta para aprimorar a análise do terreno no planejamento de operações militares do Exército brasileiro*. [Dissertação de Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica, NOVA Information Management School (NIMS), Lisboa, Portugal]. <https://run.unl.pt/handle/10362/98833>.
- Wicander, M. (2018). *Requirements for Cross Country Movement in Land Warfare*. [Master's Thesis in Defense, Swedish Defence University, Sweden]. <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:fhs:diva-7411>.

Biografia do autor principal



Renan Fabres Dalmonech, nascido em Vitória-ES em 1990, possui graduação em Ciências Militares e Administração pela Academia Militar das Agulhas Negras (AMAN) (2008-2012) e em Engenharia Cartográfica pelo Instituto Militar de Engenharia (IME) (2015-2018). Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em Ciências Geodésicas (2019-2025). Possui pós-graduação lato sensu em radiocomunicação militar pela Escola de Comunicações do Exército (2014) e em Ciências Militares pela Escola de Aperfeiçoamento de Oficiais (EsAO) (2021). É Mestre em Ciências Geodésicas pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (PPGCG), UFPR, Curitiba-PR. Atualmente exerce o cargo de Auditor Fiscal da SEFAZ/AM, tendo domicílio em Manaus-AM.



Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](#) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.