



Análise da aplicabilidade do RMSE para a detecção de regiões irregulares em estradas vicinais

Luíza Dotta Scarrone

Doutoranda em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia (PPEng), Universidade Federal do Pampa, Alegrete, Brasil, luizascarrone.aluno@unipampa.edu.br

Juliano de Almeida Zacarias

Mestrando em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia (PPEng), Universidade Federal do Pampa, Alegrete, Brasil, julianozacarias.aluno@unipampa.edu.br

Carissom Ivo Kletke

Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, Brasil, carissomkletke.aluno@unipampa.edu.br

Diego Arthur Hartmann

Docente, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, Brasil, diegohartmann@unipampa.edu.br

Jaelson Budny

Docente, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, Brasil, jaelsonbudny@unipampa.edu.br

RESUMO: A avaliação de vias não pavimentadas é complexa devido à escassez de métodos automatizados e à subjetividade das inspeções manuais. Este trabalho propõe um método simplificado para identificar irregularidades longitudinais nessas vias por meio do Erro Quadrático Médio (RMSE), utilizando drones e processamento de imagens por *Structure from Motion* (SfM). O método foi verificado em seções virtuais e validado em seções de controle, demonstrando capacidade de detectar descontinuidades de até 3 mm, comprovando a resolução adequada do modelo para identificar defeitos na estrutura. A abordagem reduz a dependência de inspeções presenciais e oferece uma solução eficiente para o monitoramento de vias não pavimentadas, contribuindo para uma gestão mais segura e precisa da malha viária.

PALAVRAS-CHAVE: Estradas Vicinais, VANT, RMSE, Manutenção de Estradas.

ABSTRACT: The evaluation of unpaved roads is complex due to the scarcity of automated methods and the subjectivity of manual inspections. This study proposes a simplified method for identifying longitudinal irregularities on such roads through the Root Mean Square Error (RMSE), using drones and image processing via *Structure from Motion* (SfM). The method was tested on virtual sections and validated on control sections, demonstrating the ability to detect discontinuities as small as 3 mm, which confirms the model's suitable resolution for identifying structural defects. This approach reduces the reliance on in-person inspections and offers an efficient solution for monitoring unpaved roads, contributing to safer and more accurate road network management.

KEYWORDS: Unpaved Roads, UAV, RMSE, Road Maintenance.

1 INTRODUÇÃO

As estradas não pavimentadas, ou vicinais, correspondem à maior parte da malha viária brasileira, com cerca de 1,4 milhão de quilômetros, que representa aproximadamente 78% da extensão total (CNT, 2024). Dentro desse cenário, as vias sob responsabilidade municipal indicam um cenário crítico, com somente 2% de sua extensão com algum tipo de revestimento (SNV, 2015). Em regiões com forte atividade agropecuária, essas vias desempenham papel estratégico no transporte de insumos, máquinas e na distribuição da produção, e sua precariedade compromete não só o conforto e a segurança dos usuários, como eleva os custos operacionais e contribui para o isolamento das comunidades rurais (CNM, 2025).

A gestão eficiente dessas vias depende do levantamento preciso de suas condições, especialmente em municípios com recursos limitados, visto que o adiamento das intervenções pode resultar em degradações severas e exigir obras de reabilitação mais complexas e onerosas (Oda, 1995). No entanto, os métodos tradicionais, como inspeções manuais e uso de veículos adaptados com câmeras, são demorados, dependem de mão de obra especializada e estão sujeitos à subjetividade do olhar do avaliador, além de envolverem riscos em áreas de tráfego ativo ou de difícil acesso (Zhang *et al.*, 2008; Al-Suleiman, 2015).

Para detalhamento quanto à profundidade dos defeitos, sensores específicos foram introduzidos, mas exigem adaptações caras. O uso desses equipamentos se torna inviável em trechos muito deteriorados, devido ao risco de dano tanto aos sensores quanto aos veículos, impactando significativamente no tempo e custos da operação (Neckel *et al.*, 2021).

Nesse contexto, os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) se destacam pela facilidade de operação e acesso a locais remotos, representando uma alternativa promissora na avaliação de rodovias. Há um número significativo de estudos com VANTs para a análise em vias pavimentadas, onde os defeitos são detectados através da correlação visual com padrões de banco de dados. Contudo, tratando-se da análise de estradas vicinais, os defeitos são caracterizados principalmente por mudanças na seção da via, e não apenas por padrões visuais. Normalmente, essas vias apresentam uma heterogeneidade visual mais elevada, devido à irregularidade inerente à falta de revestimento asfáltico, diversidade de coloração do solo, presença de água acumulada e vegetação (Oda, 1995).

Eisenbeiss (2004) propôs o uso de Modelos Digitais de Superfície (MDS) gerados a partir de fotos aéreas para análise de pavimentos, método não difundido na época devido às limitações computacionais então existentes. Atualmente, diversos *softwares* disponíveis no mercado possibilitam o desenvolvimento da ideia. Através do emprego da técnica fotogramétrica *Structure from Motion (SfM)*, é possível reconstruir ambientes tridimensionais (3D) com base em imagens bidimensionais (2D), desde que capturadas de diferentes ângulos.

Diversos trabalhos apresentam o uso do modelo tridimensional para mensuração manual dos defeitos na via, com precisão na casa dos centímetros, tanto em pavimentos asfálticos (Zhang e Elaksher, 2012; Leonardi *et al.*, 2018) quanto em vias não pavimentadas (Dobson *et al.*, 2013; Saad e Tahar, 2019; Oppong-Adu, 2023). No entanto, ainda predominam abordagens com pouca incorporação de métodos minimamente automatizados para a identificação das irregularidades.

Diante desse cenário, evidencia-se a necessidade de metodologias que proporcionem maior precisão, agilidade e segurança na avaliação das condições das vias não pavimentadas. Neste trabalho, propõe-se uma abordagem baseada na aplicação do Erro Quadrático Médio (RMSE) para a detecção de regiões irregulares em estradas vicinais, a partir de modelos tridimensionais gerados com o emprego de levantamentos fotogramétricos com drone. Para a verificação da metodologia, foram conduzidas análises em seções virtuais, e, para sua validação, em seções de controle.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais utilizados

O imageamento aéreo foi realizado com o uso de um Drone DJI Mavic 2 Enterprise Advanced (Figura 1), cujo sensor possibilita imagens de 48 megapixels e com autonomia de voo de até 31 minutos. Para a análise das imagens, foi utilizado um computador com um processador Core i9 13900K com 128GB de RAM e uma placa de vídeo GeForce RTX 4090.



Figura 1. DJI Mavic 2 Enterprise Advanced (DJI, 2021).

2.2 Processamento fotogramétrico

O processamento fotogramétrico e modelagem tridimensional se deu por meio do software 3DF *Zephyr* (versão 7.531), em sua modalidade de licença estudantil, cujo fluxo de processamento está ilustrado na Figura 2.



Figura 2. Processos de fotogrametria.

O *software* emprega a técnica *Structure from Motion (SfM)*, que reconstrói modelos tridimensionais a partir de imagens bidimensionais, capturadas de diferentes pontos de vista, conforme Figura 3, desde que respeitados os parâmetros mínimos de sobreposição mínima lateral de 60% e longitudinal de 30%, recomendados por Coelho e Brito (2007).

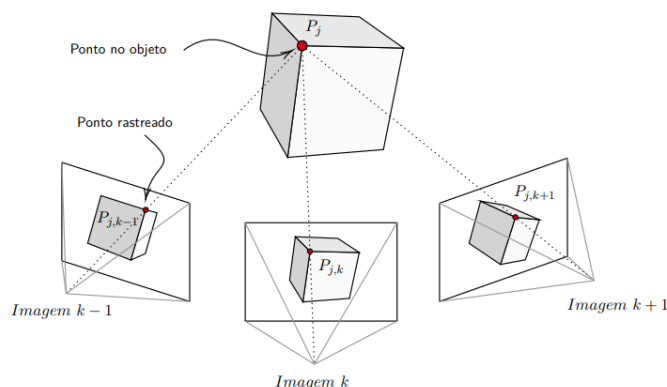


Figura 3. Representação esquemática do funcionamento do SfM (VIANA, 2021).

2.3 Tratamento dos dados

Para a detecção de regiões irregulares, propõe-se a comparação entre a linha de tendência esperada para o conjunto de pontos, em um dado intervalo (denominado amplitude), e a situação real obtida através do modelo tridimensional.

Em cada segmento, ajustou-se uma linha de tendência por meio de regressão linear, que representa o ajuste ideal dos pontos dentro do intervalo analisado. Com isso, a identificação das descontinuidades é realizada pelo cálculo da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE – do inglês *Root Mean Square Error*), conforme Equação 1, métrica que mede a dispersão dos pontos observados em relação à tendência ajustada.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2} \quad (1)$$

n: número total de pontos no segmento;

y_i: valores de elevação do perfil analisado;

y'_i: valores de elevação previstos pela linha de tendência.

Assim, sempre que houver uma descontinuidade, um valor numérico positivo de erro indicará sua presença. Valores elevados de RMSE apontam para uma maior variação dos dados em relação à tendência. Na Figura 4, onde a linha vermelha representa a linha de tendência e os pontos verdes representam os valores observados, tem-se dois exemplos dessa análise: o primeiro simula uma condição ideal, onde os pontos observados coincidem com a tendência; o segundo, por sua vez, ilustra uma descontinuidade, caracterizada pelo desvio entre os pontos observados e a linha de tendência.

O processamento de dados foi automatizado por meio de um código desenvolvido em *Python*, permitindo a aplicação em diferentes casos, assegurando consistência nos resultados e reduzindo o tempo de processamento.

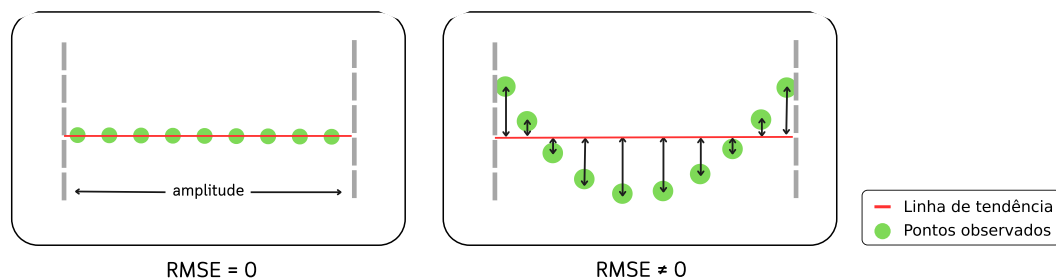


Figura 4. Exemplos de RMSE.

2.4 Perfis de análise

2.4.1 Seções virtuais

Para verificar o funcionamento e aplicabilidade do método de análise dos dados, bem como o código desenvolvido, foram criadas seções virtuais que simulam trechos de via com 4 metros de extensão, e descontinuidades de dimensões conhecidas, variando de 1 a 20 cm, em uma situação plana e outra inclinada, conforme Figura 5.

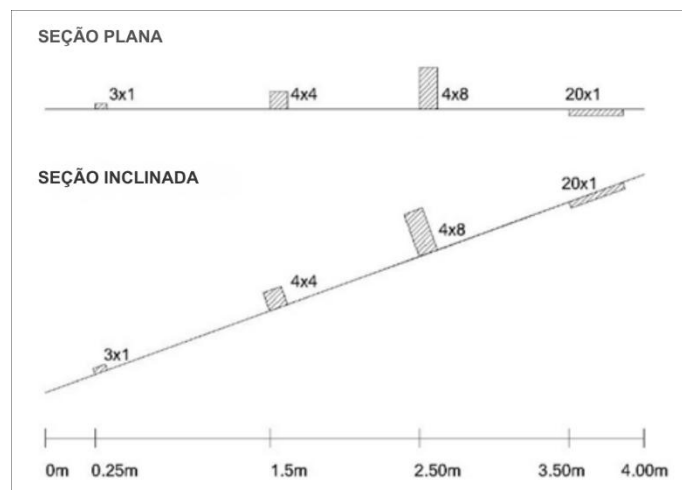


Figura 5. Seções virtuais.

2.4.2 Seções de controle

Com o objetivo de validar o funcionamento do método e sua futura aplicação em estradas reais, definiram-se seções de controle. Para isso, elementos com dimensões previamente conhecidas foram posicionados sobre o terreno, conforme ilustrado na Figura 6a. A seguir, foi conduzido todo o processo, desde o imageamento com drone até a análise matemática. Inicialmente foram obtidas imagens de referência do terreno e, em seguida, o processo foi repetido com os elementos posicionados.

O levantamento fotográfico foi realizado a uma altura de 20 metros, com captura em diferentes posições, assegurando os valores mínimos de sobreposição para gerar um modelo tridimensional de qualidade.

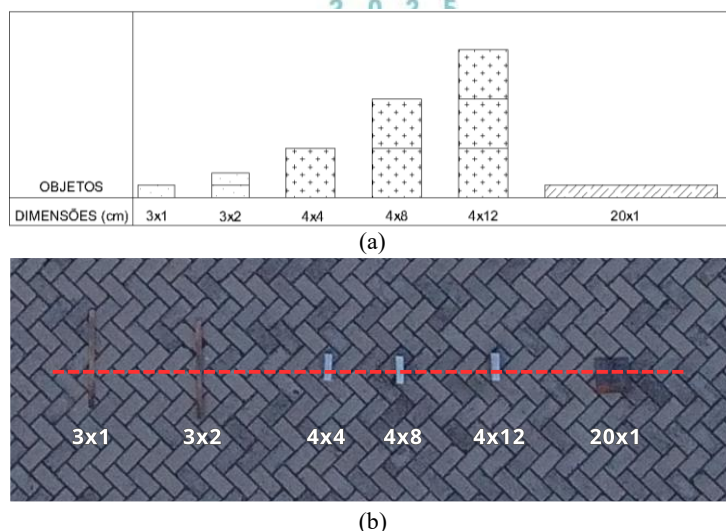


Figura 6. Seções reais: (a) Esquema ilustrativo dos objetos utilizados; (b) Vista dos objetos em planta.

Com o imageamento, e através da técnica SfM, foi possível obter uma malha tridimensional, onde pode-se observar os elementos posicionados para verificação, bem como demais variações topográficas presentes no terreno. Assim, extraíram-se seções de interesse, com extensão de 4 metros, de modo a abranger todos os objetos na área de estudo, conforme destacado em vermelho na Figura 6b. Essas seções retornam valores de latitude, longitude e elevação para cada ponto da malha tridimensional contido nelas, possibilitando a reconstrução do perfil longitudinal do trecho.

3 RESULTADOS

Inicialmente, são expostos os dados resultantes da verificação do método, utilizando-se seções virtuais. Na sequência, o código desenvolvido para o tratamento dos dados é aplicado em seções de teste. Os perfis longitudinais estão apresentados em plotagem linear de cor preta e os resultados de RMSE, em barras verticais verdes. Para todos os casos, as amplitudes de análise utilizadas foram de 0,5 e 1,0 metros, visando refletir valores reais de diâmetros de rodas de veículos comerciais e de carga.

3.1 Seções virtuais

As descontinuidades nos perfis longitudinais foram posicionadas de modo a simular a existência de defeitos na superfície de rolamento, com extensões variando entre 1 e 20 cm, conforme especificado no item 2.4.1.

Observa-se que o método se mostrou eficaz na identificação de descontinuidades nos dois tipos de perfis virtuais analisados: plano e inclinado. Os resultados demonstram que, embora o método seja aplicável a todas as geometrias analisadas, sua precisão e interpretação variam conforme as características do perfil e a amplitude de análise.

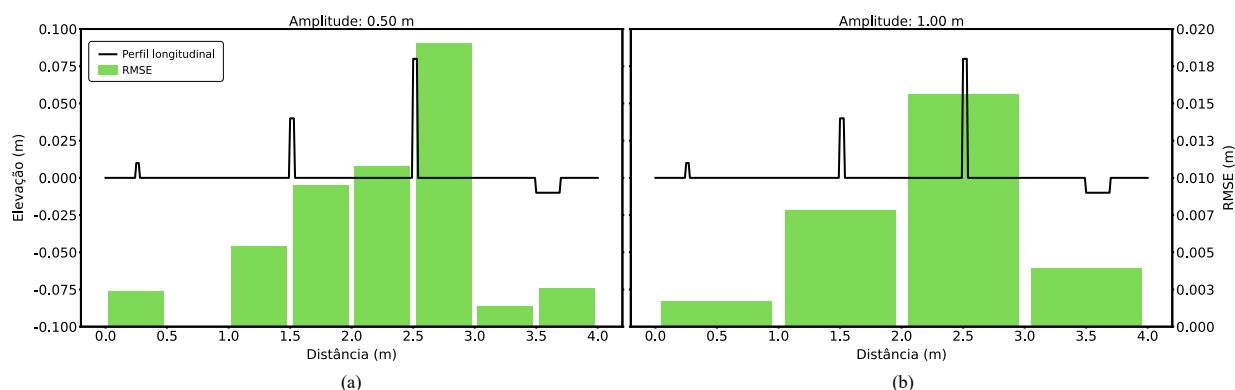


Figura 7. Perfil virtual plano.

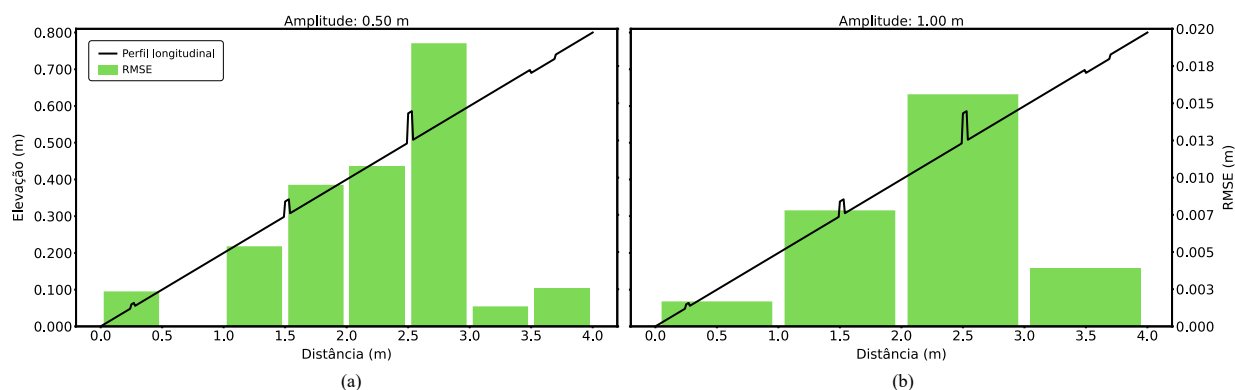


Figura 8. Perfil virtual inclinado.

Em todos os casos, o RMSE permitiu identificar a presença de discontinuidades, independentemente da amplitude considerada. No entanto, a análise com menor amplitude, ilustrada nas Figuras 7a e 8a, permitiu identificar o início e final da discontinuidade, a depender de sua posição em relação à amplitude.

No perfil plano, assim como no perfil inclinado, o RMSE manteve-se igual a zero nas regiões uniformes, como observado nas Figuras 7a e 8a, entre as distâncias de 0,5 m e 1,0 m, apresentando picos de RMSE nas regiões irregulares. Mostrando ser capaz de diferenciar regiões regulares de irregulares em ambos os cenários.

3.2 Seções reais

Posteriormente, o código foi aplicado às seções reais de controle, ou seja, nos dois perfis obtidos a partir do imageamento com drone: perfil da seção de controle referência (Figura 9) e perfil da seção de controle com objetos (Figura 10).

As seções reais foram captadas em uma área pavimentada com blocos intertravados de concreto. A linha contínua preta, que representa o perfil do terreno, evidencia que o imageamento permitiu identificar variações de cota entre blocos que compõem o terreno, com distância aproximada de 3 mm entre picos e vales, indicando que a resolução do modelo é capaz de detectar defeitos na estrutura.

Os valores de RMSE foram superiores a zero em todos os casos, o que se atribui às irregularidades naturais do perfil dos blocos intertravados e ao uso de ajustes por tendências lineares no código. Ainda assim, os valores de RMSE nas regiões sem os objetos permanecem baixos quando comparados àqueles obtidos nos trechos com discontinuidades inseridas.

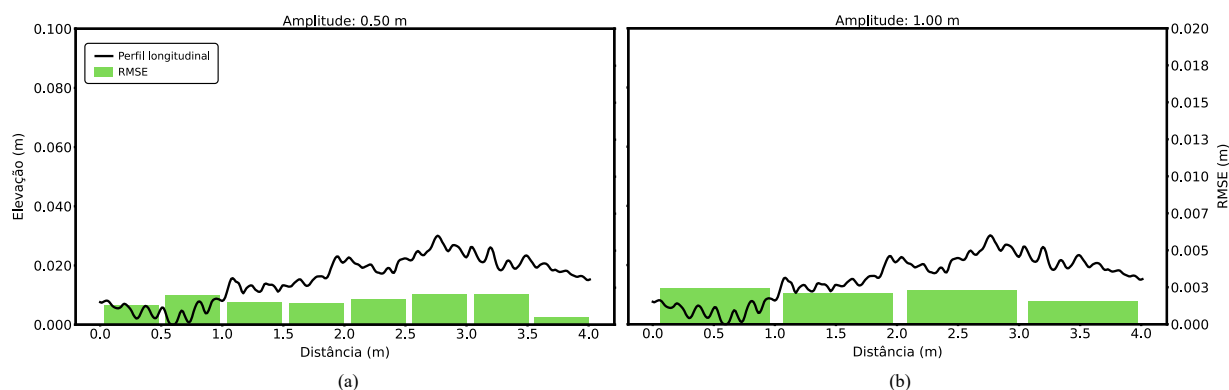


Figura 9. Seção de controle referência.

Na Figura 10, observa-se o surgimento de picos de RMSE de até 0,018, o que confirma a efetividade da lógica de detecção de defeitos implementada, nas duas amplitudes de análise. Assim como nas seções virtuais, os picos de RMSE identificam a posição dos objetos de controle. Os objetos inseridos no perfil podem ser facilmente observados em formas de picos de RMSE na análise com amplitude de 0,50 m, nas distâncias de 2, 2,5, 3 e 3,6 metros.

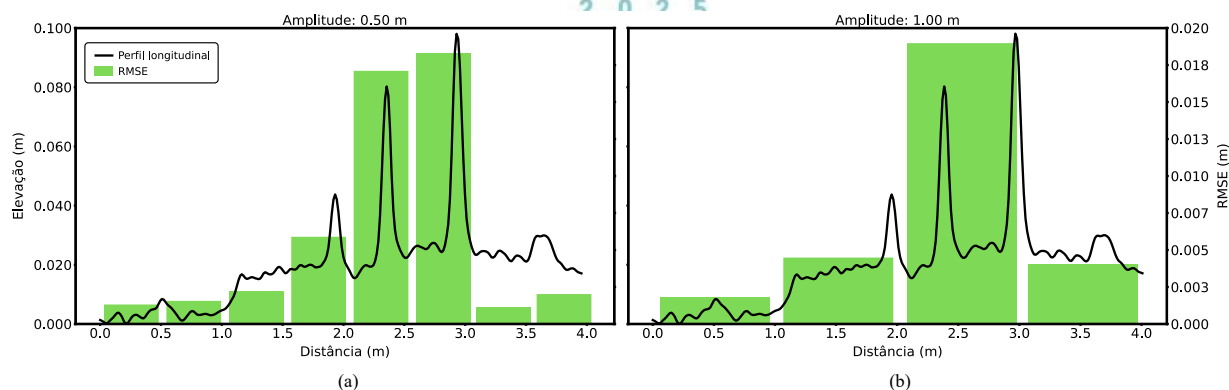


Figura 10. Seção de controle com objetos.

Quando comparados os perfis, pequenas variações podem ser observadas entre os trechos analisados. Estas são referentes à dificuldade em traçar a seção com objetos perfeitamente sobreposta a de referência. Ainda assim, os valores de RMSE diferem nos locais esperados, onde os objetos de controle foram inseridos.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através das seções virtuais, verificou-se a aplicação do código em situações simuladas de vias planas e inclinadas, onde foram identificados defeitos simulados com alturas variando entre 1 e 8 cm em todos os cenários e para as amplitudes de análise de 0,50 e 1,00 m. Posteriormente, a aplicação em seções de teste permitiu validar o funcionamento do código em seções longitudinais obtidas a partir dos modelos tridimensionais, gerados a partir do levantamento fotográfico com VANT, possibilitando observar variações milimétricas.

Considerando que as vias não pavimentadas apresentam irregularidades naturais devido à ausência de revestimento, os resultados obtidos na área com blocos intertravados, cuja superfície possui comportamento semelhante, indicam que o método adotado apresenta potencial de aplicabilidade em estradas vicinais. Por meio da análise do RMSE, foi possível diferenciar os erros associados às irregularidades naturais do terreno daqueles causados pela presença dos objetos posicionados.

Atualmente, não é possível estabelecer uma relação direta entre a magnitude da descontinuidade e um valor específico de RMSE, uma vez que o valor indicado reflete a variação de elevação dos pontos observados e dos projetados pela linha de tendência, em média, para a amplitude de análise. Ressalta-se que, por se tratar de um erro quadrático médio, o RMSE não conserva a informação sobre o sinal do erro. Dessa forma, embora a presença da descontinuidade possa ser detectada, não é possível inferir se a variação é positiva ou negativa.

Quando analisados em conjunto, os resultados obtidos sugerem que o uso de VANTs, aliado à análise com base no RMSE, compõe um método viável para a aplicação em diversos cenários. Dentre as principais vantagens do método proposto, destaca-se a possibilidade de avaliação remota das condições das vias, que reduz a necessidade de deslocamento de equipes técnicas para campo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 pelas bolsas concedidas ao primeiro e segundo autor, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa PIBIC do terceiro autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-SULEIMAN, T. I. (2015). Effect of human factor on variability of pavement condition data. *International Conference on Advances in Civil and Environmental Engineering*. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/304136744>.
- COELHO, L.; BRITO, J. N. (2007). *Fotogrametria digital*. Rio de Janeiro: EdUERJ. Disponível em: http://www.efoto.eng.uerj.br/images/Documentos/fotogrametria_digital_revisado.pdf.



- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS (CNM). Estradas vicinais: Importante rede viária para escoamento da produção agrícola e mobilidade rural nos municípios. 2025. Disponível em: <https://cnm.org.br/biblioteca/exibe/15928>. Acesso em: agosto de 2025.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT (2024). Pesquisa CNT de rodovias. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br>. Acesso em: agosto de 2025.
- DOBSON, R. J.; BROOKS, C.; ROUSSI, C.; COLLING, T. (2013). Developing an unpaved road assessment system for practical deployment with high-resolution optical data collection using a helicopter UAV. *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Atlanta, GA, USA, pp. 235–243. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2013.6564695>.
- EISENBEISS, H. (2004). A mini unmanned aerial vehicle (UAV): system overview and image acquisition. *International Workshop on Processing and Visualization Using High Resolution Imagery*, Pitsanulok.
- LEONARDI, A. *et al.* (2018). A deep learning framework for road surface roughness classification using smartphone sensors. *Sensors*, v. 18, n. 3, 863.
- NECKEL, N. R.; VIVAN, G. M.; SOARES, A. C. V.; LONGHINI, R. H. O.; VALQUES, I. J. B. (2021). Drone and VANTs as a tool for surveying hard-to-reach areas. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 1, p. 826–845. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/41122>.
- ODA, S. (1995). Caracterização de uma rede municipal de estradas não-pavimentadas. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.18.1995.tde-14012005-161818>.
- OPPONG-ADU, W. (2023). Mapping of road surface condition features for unpaved roads through the use of remotely sensed imagery from unmanned aerial vehicle. Disponível em: doi.org/10.21203/rs.3.rs-2623642/v1.
- SAAD, A. M.; TAHAR, K. N. (2019). Identification of rut and pothole by using multirotor unmanned aerial vehicle (UAV). *Measurement*, v. 137, p. 647–654. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.01.093>.
- SISTEMA NACIONAL DE VIAÇÃO – SNV (2015). Extensão das rodovias nacionais. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/atlas-e-mapas/pnv-e-snv>.
- VIANA, C. D. (2021). Fotogrametria digital multi-escala para aquisição de dados estruturais. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.44.2021.tde-18012022-122057>.
- ZHANG, C.; ELAKSHER, A. (2012). An unmanned aerial vehicle-based imaging system for 3D measurement of unpaved road surface distresses. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, v. 27, p. 118–129. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2011.00727.x>.
- ZHANG, C. *et al.* (2008). An UAV-based photogrammetric mapping system for road condition assessment. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. 37, p. 627–632. Disponível em: https://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/5_pdf/109.pdf.