

Atendendo a solicitação do(a) autor(a),
o texto completo desta tese/dissertação
será disponibilizado somente a partir de
02/02/2023.

At the author's request, the full text of
this thesis/dissertation will not be
available until Feb 02, 2023.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de São José dos Campos
Instituto de Ciência e Tecnologia



Cemaden
Centro Nacional de Monitoramento
e Alertas de Desastres Naturais

UNIDADE DE PESQUISA DO
MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA,
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES



PÁTRIA AMADA
BRASIL
GOVERNO FEDERAL

FELICIA FRANÇA PEREIRA

**COMPARAÇÃO DE DADOS DERIVADOS DE LIDAR E VANT PARA O
MAPEAMENTO DE SUSCETIBILIDADE DE DESLIZAMENTO
USANDO O ALGORITMO RANDOM FOREST**

FELICIA FRANÇA PEREIRA

**COMPARAÇÃO DE DADOS DERIVADOS DE LIDAR E VANT PARA O
MAPEAMENTO DE SUSCETIBILIDADE DE DESLIZAMENTO USANDO O
ALGORITMO RANDOM FOREST**

Dissertação apresentada ao Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Campus de São José dos Campos; Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), como parte dos requisitos para a obtenção do título de MESTRE pelo Programa de Pós-graduação em DESASTRES NATURAIS.

Área: Desastres naturais. Linha de pesquisa: Desastres associados a eventos extremos, inundações e movimentos de massa.

Orientador: Profa. Dra. Tatiana Sussel Gonçalves Mendes

Coorientador: Prof. Dr. Silvio Jorge Coelho Simões

São José dos Campos

2022

Instituto de Ciência e Tecnologia [internet]. Normalização de tese e dissertação [acesso em 2022]. Disponível em <http://www.ict.unesp.br/biblioteca/normalizacao>

Apresentação gráfica e normalização de acordo com as normas estabelecidas pelo Serviço de Normalização de Documentos da Seção Técnica de Referência e Atendimento ao Usuário e Documentação (STRAUD).

Pereira, Felicia França

Comparação de dados derivados de LiDAR e VANT para o mapeamento de suscetibilidade de deslizamento usando o algoritmo Random Forest / Felicia França Pereira. - São José dos Campos : [s.n.], 2022.
56 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Desastres Naturais) - Pós-graduação em Desastres Naturais - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia; Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), São José dos Campos, 2022.

Orientadora: Tatiana Sussel Gonçalves Mendes

Coorientador: Silvio Jorge Coelho Simões

1. Floresta Aleatória. 2. Modelo de Suscetibilidade a Deslizamentos. 3. MDT. 4. LiDAR. 5. VANT. I. Mendes, Tatiana Sussel Gonçalves , orient. II. Simões, Silvio Jorge Coelho, coorient. III. Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos. IV. Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho' - Unesp. V. Universidade Estadual Paulista (Unesp). VI. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden). VII. Título.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Tatiana Sussel Gonçalves Mendes (Orientador)

Universidade Estadual Paulista (Unesp)

Instituto de Ciência e Tecnologia

Campus de São José dos Campos

Prof. Dr. Rogério Galante Negri

Universidade Estadual Paulista (Unesp)

Instituto de Ciência e Tecnologia

Campus de São José dos Campos

Dra. Alessandra Cristina Corsi

Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT

Seção de Investigações, Riscos e Gerenciamento Ambiental – SIRGA

São José dos Campos, 02 de agosto de 2022.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que me iluminou e me deu forças para nunca desistir dos meus objetivos.

Aos meu pais Maria França e Alberto Carvalho, que me deram o total apoio ao longo da minha vida e nunca me deixaram faltar nada, sempre torcendo por mim. À minha irmã Alicia França que sempre esteve me apoiando, e a minha família pelo suporte. Ao meu querido Arian, que me aconselhou e me apoiou nos momentos difíceis, obrigada pela paciência em meus momentos de estresse e desânimo e por ser meu amigo e amor.

Em especial à minha orientadora Dra. Tatiana Sussel, que contribuiu de forma significativa em minha carreira acadêmica e profissional, e que sempre esteve ao meu lado. Agradeço pela oportunidade, toda a paciência e conselhos durante esse período. Ao meu coorientador Dr. Silvio Simões por todo o ensinamento, discussões e contribuições durante o período do mestrado.

À Jennifer e a Tatiany, pelas noites de estudo, inúmeras reuniões e todo o aprendizado compartilhado ao longo dessa pesquisa.

Meu muito obrigado aos amigos Fábio e Ana, com quem dividi moradia na república Cab. Da Leila, vocês foram especiais nessa caminhada.

À todas as outras pessoas não citadas, mas que contribuíram direta ou indiretamente os meus sinceros agradecimentos, essa conquista não é só minha.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	3
RESUMO	4
ABSTRACT	5
1 INTRODUÇÃO	8
2 ARTIGO	13
2.1 Artigo "Comparison of LiDAR and UAV derived data for landslide susceptibility mapping using Random Forest algorithm"	13
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
REFERÊNCIAS	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AUC	<i>Area Under the Curve</i>
ANN	<i>Artificial Neural Networks</i>
CRED	Centro de Pesquisas de Epidemiologia em Desastres
DT	<i>Decision Tree</i>
LiDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
PMRR	Plano Municipal de Redução de Riscos
PPDC	Plano Preventivo de Defesa Civil
RF	<i>Random Forest</i>
ROC	<i>Receiver Operating Characteristic Curve</i>
RP	Reconhecimento de Padrões
SR	Sensoriamento Remoto
SVM	<i>Support Vector Machine</i>
UNISDR	Estratégia Internacional de Nações Unidas para a Redução de Desastres
VANT	Veículo Aéreo Não-Tripulado

PEREIRA, F.F. Comparação de dados derivados de LiDAR e VANT para o mapeamento de suscetibilidade de deslizamento usando o algoritmo Random Forest. Dissertação. São José dos Campos: Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia; Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), 2022.

RESUMO

Impulsionados pela tectônica, clima e/ou atividade humana, os deslizamentos de terra são onipresentes. Este fenômeno é uma das principais ameaças ao desenvolvimento econômico e social das zonas montanhosas, muitas vezes resultando em vítimas e consequências econômicas. O mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos é considerado uma importante ferramenta para os gestores locais localizarem as áreas que possuem maior probabilidade de ocorrência de eventos e pensarem em estratégias de redução de risco. O Modelo Digital de Terreno (MDT) é um dos dados fundamentais para os modelos de predição e é usado para derivar importantes fatores condicionantes para análises de suscetibilidade de deslizamento em escala detalhada. Desse modo, a utilização de técnicas de Sensoriamento Remoto e Fotogrametria, usando as tecnologias de varredura a LASER (Light Detection and Range - LiDAR) e de imageamento por Veículo Aéreo Não-Tripulado (VANT), podem impulsionar esse levantamento, produzindo dados de altíssima resolução. Nesse sentido, este estudo teve como objetivo comparar mapas de suscetibilidade a deslizamentos gerados pelo algoritmo de aprendizado de máquina floresta aleatória (Random Forest - RF) com dados de LiDAR e VANT. Para tanto, o desempenho alcançado na previsão foi avaliado usando medidas de avaliação estatística baseadas em conjuntos de dados de treinamento e validação. Os resultados obtidos mostraram que a precisão de ambos os modelos é maior que 0,70, a área sob a curva (AUC) é maior que 0,80, e o modelo gerado a partir dos dados LiDAR é mais preciso. Os resultados também mostraram que os dados do VANT têm potencial para uso no mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos em escala intraurbana, contribuindo para estudos em áreas de risco sem dados disponíveis.

Palavras-chave: floresta aleatória; modelo de suscetibilidade a deslizamentos; MDT; LiDAR; VANT.

PEREIRA, F.F. Comparison of LiDAR and UAV derived data for landslide susceptibility using Random Forest algorithm. Dissertation. São José dos Campos: São Paulo State University (Unesp), Institute of Science and Technology; National Center for Monitoring and Early Warning of Natural Disasters (Cemaden), 2022.

ABSTRACT

Driven by tectonics, weather and/or human activity, landslides are ubiquitous. This phenomenon is one of the main threats to the economic and social development of mountainous areas, often resulting in victims and economic consequences. The landslide susceptibility mapping is considered an important tool for local managers to locate the most vulnerable areas and think about risk reduction strategies. The Digital Terrain Model (DTM) is one of the fundamental modeling data and is used to derive important conditional factors for detailed scale landslide susceptibility analyses. Thus, the use of Remote Sensing and Photogrammetry techniques, using LASER (Light Detection and Range - LiDAR) and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imaging technologies, can boost this survey, producing data of very high resolution. In this sense, this study aimed to compare landslide susceptibility maps generated by the Random Forest (RF) machine learning algorithm with LiDAR and UAV data. To this end, the performance achieved in the prediction was evaluated using statistical evaluation measures based on training and validation data sets. The results obtained showed that the accuracy of both models is greater than 0.70, the area under the curve (AUC) is greater than 0.80, and the model generated from LiDAR data is more accurate. The results also showed that UAV data have potential for use in mapping landslide susceptibility on an intra-urban scale, contributing to studies in risk areas without available data.

Keywords: random forest; landslide susceptibility model; DTM; LiDAR; UAV

1 INTRODUÇÃO

Um deslizamento de terra é um fenômeno natural em que o material em uma encosta é movido para baixo devido à gravidade e outros fatores externos. Impulsionados pela tectônica, clima e/ou atividade humana, os deslizamentos de terra são onipresentes em qualquer ambiente terrestre inclinado (FROUDE; PETLEY, 2018). São fenômenos naturais extremamente complexos capazes de causar danos significativos às pessoas, propriedades e redes de transporte (ABDULWAHID; PRADHAN, 2017).

Em um contexto global, o fenômeno é uma das principais ameaças ao desenvolvimento econômico e social das zonas montanhosas. Segundo o Centro de Pesquisas de Epidemiologia em Desastres (CRED) e a Estratégia Internacional de Nações Unidas para a Redução de Desastres (UNISDR) (2018), entre 1900 e 2017 cerca de 130.000 pessoas perderam a vida por causa de deslizamentos de terra e inundações. Ademais, conforme os resultados estatísticos do Banco Mundial (2005) a perda econômica causada por deslizamentos de terra é de cerca de US\$ 20 bilhões por ano e 300 milhões de pessoas vivem em áreas propensas a tais eventos (KAO; CHIU; TSAI, 2017).

No Brasil, os desastres provocados por deslizamentos geralmente são associados a períodos de precipitação intensa e, principalmente em regiões montanhosas e serranas, onde predomina clima úmido, com relevos colinosos e/ou tabulares, além de um expansivo processo de urbanização (PICHLER, 1957). Os municípios brasileiros com situações consideradas de alto e muito alto risco perante enchentes, enxurradas e deslizamentos, estão situados no Rio de Janeiro, Bahia, São Paulo e Pernambuco (SANTOS, 2012).

Na Serra do Mar, que é uma das feições orográficas mais proeminentes do litoral sul e sudeste do país medindo 1.500 km de extensão, foi palco de grandes eventos de deslizamentos como o de Santos em 1928, Caraguatatuba em 1967 e Cubatão em 1985; (PICHLER, 1957; LISTO; VIEIRA, 2012; LISTO; GOMES; FERREIRA, 2021). Nota-se que entre 1990 e 2012, os deslizamentos tiveram uma grande variação, aumentando em 21,7 vezes, e a maioria dos óbitos situaram-se na região sudeste (CEPED, 2013).

O município de Santos, situado no litoral do estado de São Paulo, possui áreas de morro residuais que apresentam intensa ação do intemperismo químico e físico. Nessas áreas ocorreram vários deslizamentos catastróficos, como o ocorrido em 1928 e em 1956 (PICHLER, 1957). Esses desastres motivaram a realização de um amplo trabalho de contenção das encostas e monitoramento da situação geomórfica nos morros santistas, porém a expansão da urbanização nessas áreas intensifica problemas estruturais em relação aos desastres de deslizamentos na região.

No intuito de reduzir o risco de desastres, em 1989 teve início a operação do Plano Preventivo de Defesa Civil (PPDC) do município, o qual se mostrou muito eficiente visto a queda expressiva nos números de óbitos do município (FERREIRA, 2016). Em 2005 o primeiro Plano Municipal de Redução de Riscos (PMRR) de Santos foi elaborado (CANIL, 2010). Sendo

atualizado em 2012 com medidas de prevenção e correção para eliminar ou reduzir os riscos geológico que incluem deslizamentos (FERREIRA; ABIKO, 2019). Dessa forma, o mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos desempenha um papel importante no desenvolvimento de medidas preventivas, pois visa indicar a probabilidade de ocorrência de processos naturais e induzidos (CARVALHO; GALVÃO, 2016).

Para o mapeamento da suscetibilidade a deslizamento diversas metodologias já foram aplicadas, as quais podem ser divididas em qualitativas e quantitativas (XIE et al., 2018). Análises qualitativas são baseadas em julgamentos de especialistas sobre fatores condicionantes a deslizamentos. Enquanto que, em abordagens quantitativas, são utilizadas as relações matemáticas entre locais de deslizamentos e fatores casuais (NEUHÄUSER; DAMM; TERHORST, 2012). As abordagens quantitativas tem se destacado nos últimos anos, com a utilização de dados de inventário e dados morfométricos de cicatrizes de deslizamentos já ocorridos devido a performance obtida (LIU et al., 2021; YOUSSEF; POURGHASEMI, 2021).

Os modelos estatísticos usados para a análise de suscetibilidade a deslizamentos tornaram-se, dentre os modelos quantitativos, um dos métodos mais utilizados para este tipo de análise, pois baseiam-se na relação funcional entre os fatores condicionantes aos deslizamentos e os deslizamentos pré-existent. Tais modelos possibilitam determinar o peso das variáveis envolvidas e, também, a validação dos resultados (ZÉZERE et al., 2017). Este modelo utiliza diferentes técnicas estatísticas clássicas como, técnicas probabilísticas, Regressão Logística, Índice Estatístico, Razão de Frequência e Fator de Certeza (LEE; MIN, 2001; WU et al., 2016; ZHAO et al., 2015; PIRASTEH; LI, 2017; JULIEV et al., 2019). Porém, os métodos estatísticos exigem a coleta de grandes quantidades de dados para produzir resultados confiáveis (YILMAZ, 2009).

Os métodos baseados em aprendizado de máquina, conceitualmente, aprendem com os dados e não dependem de funções baseadas em regras. Se tratando de relações não lineares os dados podem ser modelados de forma eficaz de acordo com o método adotado. Estes métodos mostram-se superiores aos métodos estatísticos clássicos em detrimento da maior capacidade de precisão de previsão. O uso de métodos de aprendizado de máquina para aprimorar o mapeamento tem sido cada vez mais utilizado nos últimos anos a partir de técnicas como Redes Neurais Artificiais (do inglês, Artificial Neural Networks - ANN) (HUANG et al., 2020a; HUANG et al., 2020b; LUO et al., 2019), máquina de vetor de suporte (do inglês, Support Vector Machine - SVM) (WANG; DUAN; HONG, 2019; HUANG; ZHAO, 2018), floresta aleatória (do inglês, Random Forest - RF) (ARABAMERI et al., 2020; CHEN et al., 2018; FANG et al., 2021), árvore de decisão (do inglês, Decision Tree - DT) (PHAM et al., 2019; HUANG et al., 2020b).

Dentre os algoritmos de aprendizado de máquina, o algoritmo RF destaca-se por sua capacidade de processar dados massivos, que podem ser categóricos ou numéricos, possibilitando a obtenção de altos valores de precisão na modelagem de suscetibilidade a deslizamentos (SHIRVANI, 2020). Este método usa estimativa imparcial na construção do modelo, o que significa que o treinamento é rápido e simples de implementar (RODRIGUEZ-GALIANO et al., 2012). O

algoritmo mostrou-se uma técnica de alto desempenho com aplicações para o mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos (CHEN et al., 2017; TAALAB; CHENG; ZHANG, 2018; PARK; KIM, 2019; DOU et al., 2019). Dou et al. (2019) expuseram que, em geral, o RF demonstrou melhor desempenho em ambas as amostras com Area Under the Curve (AUC) > 0,9, em relação o DT para mapear a suscetibilidade ao deslizamento de terra induzida pela chuva em escala regional no Japão. Youssef e Pourghasemi (2021) realizaram uma análise com sete métodos de aprendizado de máquina para a modelagem de suscetibilidade a deslizamento de terra e a comparação de seus desempenhos e resultados mostraram que o RF foi um dos métodos que produziu melhor desempenho em comparação aos outros, obtendo precisão igual a 95,1%.

Diante da complexidade dos eventos de deslizamento de terra, além das implementações de técnicas avançadas de aprendizado de máquina, a qualidade dos dados de entrada é um fator determinante para o desempenho dos modelos (LIMA; STEGER; GLADE, 2021). Nos modelos de predição, os dados de entrada são fatores condicionantes que, em sua maioria, são derivados de um Modelo Digital de Elevação (MDE), os quais podem ser obtidos a partir de diversas fontes como: a digitalização de mapas topográficos, técnicas de Sensoriamento Remoto (SR) (SALEEM et al., 2019). Porém para uma escala detalhada regional é adequado o uso de modelos digitais de terreno (MDT) para que artefatos não sejam considerados na modelagem da superfície.

Atualmente, vários MDEs estão disponíveis gratuitamente (por exemplo, Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM); Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection (ASTER) (RABBY; ISHTIAQUE; RAHMAN, 2020), esses possuem resolução espacial que podem ser consideradas apropriadas para a análise em escalas pequenas e médias, mas é demasiadamente grosseira para trabalhos em escala de detalhe. Além disso esses modelos foram obtidos há mais de duas décadas, podendo comprometer a capacidade de previsão do modelo (HAWKER et al., 2018). Em visto disso faz-se necessário o estudo com MDTs atuais e com alta resolução espacial (menor que 1 metro).

Considerando o desenvolvimento e o avanço da tecnologia, as técnicas de SR, como a fotogrametria e técnicas de varredura a LASER¹, denominado aqui como Light Detection And Ranging (LiDAR) podem produzir dados com resolução espacial sub-métrica. Essas técnicas podem ser usadas para dar suporte a modelos de previsão de deslizamento em escala detalhada, aplicados a áreas específicas de declividade, para refinar mapas de suscetibilidade a deslizamentos de mesoescala produzidos usando bancos de dados gratuitos ou MDEs derivados de mapas topográficos como base para a área.

O uso da tecnologia LiDAR está se tornando cada vez mais popular, estudos recentes têm mostrado a utilidade de dados topográficos derivados de LiDAR para mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos e inventários de deslizamentos. Gaidzik et al. (2017), ao usarem MDTs derivados de LiDAR, alcançaram alta precisão, conforme evidenciado pela precisão geral das previsões com valores de AUC entre 0,77 e 0,87. Gorsevski (2021) ao implementar uma

¹Palavra inglesa, do acrônimo Light Amplification by Stimulated Emission Radiation que significa amplificação de luz por emissão estimulada de radiação (raio LASER).

abordagem evolutiva usando classificação simbólica com programação genética, o potencial de previsão espacial da suscetibilidade ao deslizamento foi examinado e obteve-se uma precisão de 85,0%, classificando um total de 13,4% como regiões de alta suscetibilidade, com uma precisão quantitativa geral exponencial correspondente para 0,9082.

Pesquisas recentes utilizando-se de produtos cartográficos produzidos a partir da tecnologia de Veículo Aéreo Não-Tripulado (VANTs) evidenciaram a produção de dados altamente detalhados, pois a tecnologia é capaz de fornecer imagens com alta resolução espacial e uma densa nuvem de pontos com coordenadas tridimensionais. Ademais, ela proporciona imageamento de eventos temporais, flexibilidade de trajetória de voo e o acoplamento de diferentes sensores para a captação de uma grande variedade de dados de interesse, especialmente em ambientes perigosos e de difícil acesso (COLOMINA; MOLINA, 2014; BERNARDO; PALAMARA; BOIMA, 2021). Os dados obtidos por VANT estão cada vez mais presentes no monitoramento e gestão de desastres naturais (GIORDAN et al., 2017; GOMEZ; PURDIE, 2016), suscetibilidade a desastres geológicos (WANG et al., 2020), suscetibilidade a deslizamentos (TEMPA et al., 2021; GANTIMUROVA; PARSHIN; EROFEEV, 2021), monitoramento e mapeamento de deslizamentos (GIORDAN et al., 2018; PEPPA, 2018), e avaliação de deslizamento (SESTRAS et al., 2021; EKER; AYDIN; HÜBL, 2018; EKER; AYDIN, 2021).

Neste contexto, observa-se que os dados de VANT têm sido amplamente utilizados para fins de estudos de deslizamentos (PEPPA, 2018; EKER; AYDIN; HÜBL, 2018; SESTRAS et al., 2021). No entanto, devido a natureza do processo fotogramétrico, existem limitações no que tange a modelagem de regiões com cobertura vegetal densa, o que pode impactar a geração de modelos nestas regiões (HAWKER et al., 2018). A ocupação extensiva das encostas agrava ainda mais o problema pois dificulta o imageamento e a modelagem do terreno. Esta condição é comum nas regiões montanhosas de centros urbanos do Brasil, levando a problemas geológicos e hidrológicos com consequências catastróficas (MODENESI-GAUTTIERI; HIRUMA, 2004).

Portanto, embora existam alguns trabalhos utilizando dados de LiDAR e VANTs para mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos, até o momento poucos estudos aplicaram um método para comparar mapas de suscetibilidade a deslizamentos obtidos a partir de dados derivados dessas duas técnicas de levantamento. Diante disso, surge a hipótese de que, em modelos de suscetibilidade a deslizamentos, os dados de VANT podem render bons resultados comparados aos dados de LiDAR.

Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo a comparação dos dois modelos de mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos usando algoritmo de RF gerado a partir da tecnologia LiDAR e VANT para verificar se os dados derivados de VANT podem atingir precisão compatível com dados derivados de LiDAR.

Assim, essa pesquisa contribui para avaliar a capacidade dos dados de VANT para realizar estudos de suscetibilidade a deslizamentos na ausência de dados de escala mais detalhada. Este documento encontra-se organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta o artigo “*Comparison of LiDAR and UAV derived data for landslide susceptibility mapping using Random*

Forest algorithm” e o Capítulo 3 aborda as considerações finais do presente trabalho.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O mapeamento da suscetibilidade a deslizamentos de terra é um dos métodos mais importantes usados como uma medida não estrutural fundamental para prevenir vítimas humanas e perdas socioeconômicas em eventos de desastres. Portanto, o modelo de previsão de deslizamento de terra é uma ferramenta útil para agências governamentais desenvolverem estratégias para prevenir e mitigar riscos de deslizamento. Os modelos baseados em métodos de aprendizado de máquina, como o RF, podem ser utilizados por tomadores de decisão, planejadores, pesquisadores acadêmicos, engenheiros e agências governamentais para mitigar a perda de vidas humanas e propriedades.

Nesse sentido este trabalho tem como objetivo a comparação dos dois modelos de mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos usando algoritmo de RF gerado a partir da tecnologia LiDAR e VANT para verificar se os dados derivados de VANT podem atingir precisão compatível com dados derivados de LiDAR. O resultado do desempenho do modelo de predição foi avaliado considerando as métricas estatísticas. O modelo usando os dados LiDAR atingiu 0,800, 0,862, 0,862 e 0,830, respectivamente, para Precisão, Acurácia, Recall e F1-Score. Para o modelo usando os dados de VANT, os valores atingidos foram 0,797, 0,712, 0,760 e 0,752, respectivamente, para Precisão, Acurácia, Recall e F1-Score.

A área de estudo é caracterizada por encostas íngremes com deslizamentos frequentes nas estações chuvosas e suscetibilidade a deslizamentos. Os levantamentos LiDAR e VANT produziram MDTs de alta resolução (resolução espacial de 0,5 metros). Fatores de condicionantes topográficos e hidrológicos (gerados a partir de cada MDT) e geológicos foram usados para os modelos de previsão. Os resultados mostraram que ambos os modelos alcançaram acurácia acima de 0,70 e AUC maior que 0,80 e que, como esperado, o modelo gerado a partir dos dados LiDAR obteve maior acurácia.

Os mapas de suscetibilidade a deslizamentos obtidos foram reclassificados em cinco categorias, definindo as classes por intervalos iguais para comparar os modelos de suscetibilidade produzidos por diferentes tecnologias, utilizando assim o mesmo padrão para identificar níveis de suscetibilidade a deslizamentos nos dois mapas. Os intervalos usados foram: muito baixo (0,005 - 0,2), baixo (0,2 - 0,4), moderado (0,4 - 0,6), alto (0,6 - 0,8) e muito alto (0,8 - 1).

Os resultados obtidos com os dados de VANTs foram considerados consistentes com aqueles obtidos por dados de LiDAR, apesar das limitações dos dados de VANTs para áreas densamente vegetadas. Portanto, este estudo nos leva a concluir que a tecnologia VANT pode ser uma alternativa adequada para gerar mapas de suscetibilidade a deslizamentos em áreas urbanas em nível de detalhe com dados de alta resolução em áreas sem dados de alta resolução disponíveis.

Como perspectivas futuras, espera-se contribuir para implementações de modelos mais robustos para uma plataforma de alertas para deslizamentos, incluindo a pluviosidade em tempo real com dados de estações meteorológicas, além da extrapolação dos dados para a região.

REFERÊNCIAS

- ABDULWAHID, W. M.; PRADHAN, B. Landslide vulnerability and risk assessment for multi-hazard scenarios using airborne laser scanning data (LiDAR). **Landslides**, v. 14, n. 3, p. 1057–1076, 2017.
- ARABAMERI, A. et al. Landslide susceptibility evaluation and management using different machine learning methods in the Gallicash River Watershed, Iran. **Remote Sensing**, v. 12, n. 3, p. 475, 2020.
- BERNARDO, E.; PALAMARA, R.; BOIMA, R. UAV and soft computing methodology for monitoring landslide areas (susceptibility to landslides and early warning). **WSEAS Transactions on Environment and Development**, v. 17, p. 490–501, 2021.
- CANIL, K. Áreas de risco aos processos de escorregamentos no município de Santos, SP: Análise e indicadores de vulnerabilidade. In: ENCONTRO NACIONAL DOS GEÓGRAFOS, XVI, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: AGB, 2010.
- CARVALHO, C. S.; GALVÃO, T. Prevenção de riscos de deslizamentos em encostas em áreas urbanas. In: MORAIS, M. DA P.; KRAUSE, C. H.; LIMA NETO, V. C. **Caracterização e tipologia de assentamentos precários: estudos de caso brasileiros**. Brasília: IPEA, 2016. p. 169–185.
- CEPED, U. **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2012: volume brasil**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.
- CHEN, W. et al. GIS-based landslide susceptibility evaluation using a novel hybrid integration approach of bivariate statistical based random forest method. **Catena**, v. 164, p. 135–149, 2018.
- CHEN, W. et al. A comparative study of logistic model tree, random forest, and classification and regression tree models for spatial prediction of landslide susceptibility. **Catena**, v. 151, p. 147–160, 2017.
- COLOMINA, I.; MOLINA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review. **ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing**, v. 92, p. 79–97, 2014.
- DOU, J. et al. Assessment of advanced random forest and decision tree algorithms for modeling rainfall-induced landslide susceptibility in the Izu-Oshima Volcanic Island, Japan. **Science of the Total Environment**, v. 662, p. 332–346, 2019.
- EKER, R.; AYDIN, A. Long-term retrospective investigation of a large, deep-seated, and slow-moving landslide using InSAR time series, historical aerial photographs, and UAV data: The case of Devrek landslide (NW Turkey). **Catena**, v. 196, p. 104895, 2021.
- EKER, R.; AYDIN, A.; HÜBL, J. Unmanned aerial vehicle (UAV)-based monitoring of a landslide: Gallenzerkogel landslide (Ybbs-Lower Austria) case study. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 190, n. 1, p. 1–14, 2018.
- FANG, Z. et al. Landslide susceptibility mapping using rotation forest ensemble technique with different decision trees in the Three Gorges Reservoir area, China. **Remote Sensing**, v. 13, n. 2, p. 238, 2021.

FERREIRA, K.; ABIKO, A. Urban resilience and landslide risk management: The case of Santos (Brazil). In: BRUNETTA, G.; CALDARICE, O.; TOLLIN, N.; ROSAS-CASALS, M.; MORATÓ, J. **Urban resilience for risk and adaptation governance: theory and practice**. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 207–228.

FERREIRA, K. A. **Resiliência urbana e a gestão de riscos de escorregamentos: uma avaliação da defesa civil do município de Santos-sp**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2016.

FROUDE, M. J.; PETLEY, D. N. Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 18, n. 8, p. 2161–2181, 2018.

GAIDZIK, K. et al. Landslide manual and automated inventories, and susceptibility mapping using LiDAR in the forested mountains of Guerrero, Mexico. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 8, n. 2, p. 1054–1079, 2017.

GANTIMUROVA, S.; PARSHIN, A.; EROFEEV, V. GIS-based landslide susceptibility mapping of the Circum-Baikal Railway in Russia using UAV data. **Remote Sensing**, v. 13, n. 18, p. 3629, 2021.

GIORDAN, D. et al. The use of remotely piloted aircraft systems (RPASs) for natural hazards monitoring and management. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 18, n. 4, p. 1079–1096, 2018.

GIORDAN, D. et al. Use of unmanned aerial vehicles in monitoring application and management of natural hazards. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 8, n. 1, p. 1–4, 2017.

GOMEZ, C.; PURDIE, H. UAV-based photogrammetry and geocomputing for hazards and disaster risk monitoring—a review. **Geoenvironmental Disasters**, v. 3, n. 1, p. 1–11, 2016.

GORSEVSKI, P. V. An evolutionary approach for spatial prediction of landslide susceptibility using LiDAR and symbolic classification with genetic programming. **Natural Hazards**, v. 108, n. 2, p. 2283–2307, 2021.

HAWKER, L. et al. Perspectives on digital elevation model (DEM) simulation for flood modeling in the absence of a high-accuracy open access global DEM. **Frontiers in Earth Science**, v. 6, p. 233, 2018.

HUANG, F. et al. Comparisons of heuristic, general statistical and machine learning models for landslide susceptibility prediction and mapping. **Catena**, v. 191, p. 104580, 2020.

HUANG, F. et al. Landslide susceptibility prediction considering regional soil erosion based on machine-learning models. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 9, n. 6, p. 377, 2020.

HUANG, Y.; ZHAO, L. Review on landslide susceptibility mapping using support vector machines. **Catena**, v. 165, p. 520–529, 2018.

JULIEV, M. et al. Comparative analysis of statistical methods for landslide susceptibility mapping in the Bostanlik District, Uzbekistan. **Science of the Total Environment**, v. 653, p. 801–814, 2019.

KAO, L.-S.; CHIU, Y.-H.; TSAI, C.-Y. An evaluation study of urban development strategy based on of extreme climate conditions. **Sustainability**, v. 9, n. 2, p. 284, 2017.

LEE, S.; MIN, K. Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea. **Environmental Geology**, v. 40, n. 9, p. 1095–1113, 2001.

LIMA, P.; STEGER, S.; GLADE, T. Counteracting flawed landslide data in statistically based landslide susceptibility modelling for very large areas: a national-scale assessment for Austria. **Landslides**, v. 18, n. 11, p. 3531–3546, 2021.

LISTO, F. d. L. R.; GOMES, M. C. V.; FERREIRA, F. S. Evaluation of shallow landslide susceptibility and factor of safety variation using the TRIGRS model, Serra do Mar Mountain Range, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 107, p. 103011, 2021.

LISTO, F. d. L. R.; VIEIRA, B. C. Mapping of risk and susceptibility of shallow-landslide in the city of São Paulo, Brazil. **Geomorphology**, v. 169, p. 30–44, 2012.

LIU, Z. et al. Modelling of shallow landslides with machine learning algorithms. **Geoscience Frontiers**, v. 12, n. 1, p. 385–393, 2021.

LUO, X. et al. Mine landslide susceptibility assessment using ivm, ann and SVM models considering the contribution of affecting factors. **PLoS One**, v. 14, n. 4, p. e0215134, 2019.

MODENESI-GAUTTIERI, M. C.; HIRUMA, S. T. A expansão urbana no planalto de Campos do Jordão: diagnóstico geomorfológico para fins de planejamento. **Revista do Instituto Geológico**, v. 25, n. 1-2, p. 1–28, 2004.

NEUHÄUSER, B.; DAMM, B.; TERHORST, B. Gis-based assessment of landslide susceptibility on the base of the weights-of-evidence model. **Landslides**, v. 9, n. 4, p. 511–528, 2012.

PARK, S.; KIM, J. Landslide susceptibility mapping based on random forest and boosted regression tree models, and a comparison of their performance. **Applied Sciences**, v. 9, n. 5, p. 942, 2019.

PEPPA, M. V. **Morphology-based landslide monitoring with an unmanned aerial vehicle**. Tese (Doutorado) — Newcastle University, 2018.

PHAM, B. T. et al. Landslide susceptibility assessment by novel hybrid machine learning algorithms. **Sustainability**, v. 11, n. 16, p. 4386, 2019.

PICHLER, E. Aspectos geológicos dos escorregamentos de Santos. **Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia**, v. 6, n. 2, p. 68–77, 1957.

PIRASTEY, S.; LI, J. Probabilistic frequency ratio (PFR) model for quality improvement of landslide susceptibility mapping from LiDAR-derived DEMs. **Geoenvironmental Disasters**, v. 4, n. 1, p. 1–17, 2017.

RABBY, Y. W.; ISHTIAQUE, A.; RAHMAN, M. S. Evaluating the effects of digital elevation models in landslide susceptibility mapping in Rangamati district, Bangladesh. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, p. 2718, 2020.

- RODRIGUEZ-GALIANO, V. F. et al. An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. **ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing**, v. 67, p. 93–104, 2012.
- SALEEM, N. et al. Parameters derived from and/or used with digital elevation models (DEMs) for landslide susceptibility mapping and landslide risk assessment: a review. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 8, n. 12, p. 545, 2019.
- SANTOS, A. d. **Enchentes e deslizamentos: causas e soluções: áreas de risco no brasil**. São Paulo: Pini, 2012.
- SESTRAS, P. et al. Geodetic and UAV monitoring in the sustainable management of shallow landslides and erosion of a susceptible urban environment. **Remote Sensing**, v. 13, n. 3, p. 385, 2021.
- SHIRVANI, Z. A holistic analysis for landslide susceptibility mapping applying geographic object-based random forest: a comparison between protected and non-protected forests. **Remote Sensing**, v. 12, n. 3, p. 434, 2020.
- TAALAB, K.; CHENG, T.; ZHANG, Y. Mapping landslide susceptibility and types using random forest. **Big Earth Data**, v. 2, n. 2, p. 159–178, 2018.
- TEMPA, K. et al. UAV technique to localize landslide susceptibility and mitigation proposal: a case of Rinchening Goenpa landslide in Bhutan. **Natural Hazards Research**, v. 1, n. 4, p. 171–186, 2021.
- WANG, J. et al. Refined micro-scale geological disaster susceptibility evaluation based on UAV tilt photography data and weighted certainty factor method in Mountainous Area. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 189, p. 110005, 2020.
- WANG, Y.; DUAN, H.; HONG, H. A comparative study of composite kernels for landslide susceptibility mapping: a case study in Yongxin County, China. **Catena**, v. 183, p. 104217, 2019.
- WU, Y. et al. Landslide susceptibility assessment using frequency ratio, statistical index and certainty factor models for the Gangu County, China. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 9, n. 2, p. 1–16, 2016.
- XIE, P. et al. Application and comparison of logistic regression model and neural network model in earthquake-induced landslides susceptibility mapping at mountainous region, China. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 9, n. 1, p. 501–523, 2018.
- YILMAZ, I. Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comparison: a case study from Kat landslides (Tokat—Turkey). **Computers & Geosciences**, v. 35, n. 6, p. 1125–1138, 2009.
- YOUSSEF, A. M.; POURGHASEMI, H. R. Landslide susceptibility mapping using machine learning algorithms and comparison of their performance at Abha Basin, Asir Region, Saudi Arabia. **Geoscience Frontiers**, v. 12, n. 2, p. 639–655, 2021.
- ZÊZERE, J. et al. Mapping landslide susceptibility using data-driven methods. **Science of the Total Environment**, v. 589, p. 250–267, 2017.

ZHAO, C. et al. A comparative study of statistical index and certainty factor models in landslide susceptibility mapping: a case study for the Shangzhou District, Shaanxi Province, China. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 8, n. 11, p. 9079–9088, 2015.