

MONITORAMENTO DE ALTERAÇÕES EM TALUDES POR MEIO DA ANÁLISE MULTITEMPORAL DE NUVEM DE PONTOS

Palavras-Chave: SENSORIAMENTO REMOTO, *LIDAR* AEROTRANSPORTADO, MAPA DE RISCO

Autores(as):

FELIPE RODRIGUES DE OLIVEIRA, FECFAU – UNICAMP

Prof^(a). Dr^(a). HENRIQUE CÂNDIDO DE OLIVEIRA (orientador), FECFAU – UNICAMP

INTRODUÇÃO:

Deslizamentos de terra em áreas urbanas com relevo acidentado figuram entre os principais desastres naturais no Brasil, resultando frequentemente em perdas humanas, impactos ambientais e prejuízos à infraestrutura. A recorrência desses eventos é agravada pela urbanização desordenada, que leva à ocupação de zonas de risco sem planejamento ou obras de contenção, especialmente em áreas densamente povoadas e vulneráveis (CEMADEN, 2013). A gestão de risco em encostas urbanas exige o acompanhamento por órgãos como o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), o Serviço Geológico do Brasil (SGB) e as Defesas Civas municipais. Contudo, essas ações demandam tempo, mão de obra especializada e recursos financeiros elevados, o que dificulta sua aplicação em diversos casos (Santos, 2020). Nesse cenário, o uso de tecnologias de sensoriamento remoto tem se destacado como alternativa promissora, com destaque para o *LiDAR* (*Light Detection and Ranging*), capaz de gerar nuvens de pontos tridimensionais com alta resolução, mesmo sob cobertura vegetal (Burns *et al.* 2010).

Entre as aplicações mais relevantes do *LiDAR* está a análise multitemporal, que permite comparar dados adquiridos em diferentes épocas, viabilizando a detecção precoce de modificações no relevo (Barbarella e Lugli, 2015; Hung *et al.* 2019). Um exemplo importante que viabiliza essa abordagem em território nacional é o projeto Geosampa, que disponibiliza gratuitamente dados geoespaciais, incluindo nuvens de pontos *LiDAR* da cidade de São Paulo em diferentes períodos, fomentando estudos aplicados ao monitoramento urbano. Ainda assim, observa-se a necessidade de métodos acessíveis, com baixo custo computacional. Este trabalho tem como objetivo avaliar a eficácia da análise multitemporal de nuvens de pontos *LiDAR* para detectar alterações altimétricas em taludes urbanos, como ferramenta complementar às inspeções de campo, contribuindo para a prevenção de deslizamentos e a proteção de áreas vulneráveis de difícil acesso.

METODOLOGIA:

A metodologia proposta busca identificar variações topográficas em taludes por meio da análise multitemporal de nuvens de pontos *LiDAR*. A abordagem é composta por diversas etapas, desde o pré-processamento dos dados até a geração de produtos georreferenciados, como gráficos e mapas interativos. O desenvolvimento foi realizado em linguagem Python, com suporte a bibliotecas e integração com o conjunto de ferramentas *LAStools*, conforme Isenburg (s.d.).

O processo parte de dois conjuntos de dados *LiDAR* representados por Modelos Digitais de Superfície (MDS), que são filtrados, e assim, convertidos em Modelos Digitais de Terreno (MDTs). A partir desses produtos, identifica-se o ponto de menor cota para servir de referência na construção de perfis altimétricos. Os perfis gerados para ambos os períodos são então interpolados e comparados. A análise é repetida em múltiplas direções por meio de um modelo radial adaptativo. Os resultados são convertidos em produtos gráficos e mapas georreferenciados. A Figura 1 ilustra esse fluxo de trabalho, detalhado nas subseções a seguir.

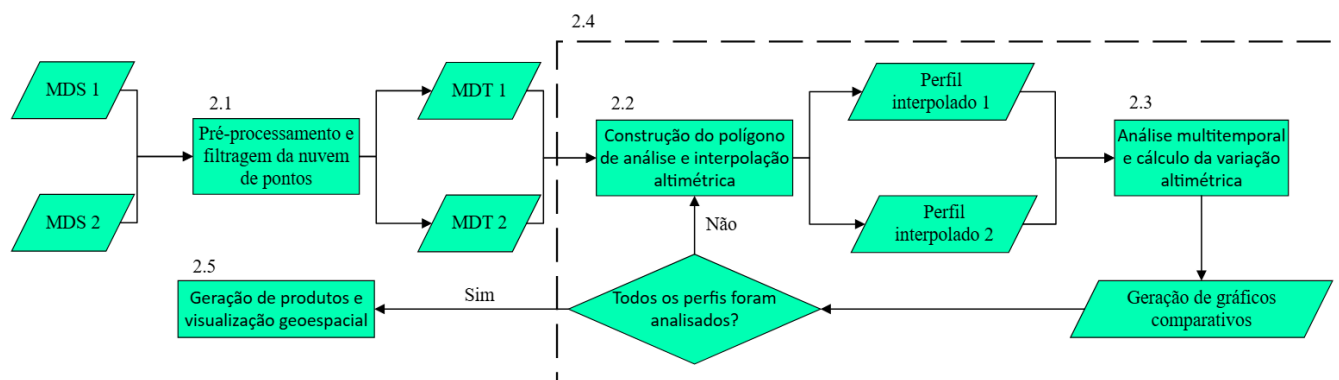


Figura 1 – Fluxograma da análise multitemporal de nuvens de pontos *LiDAR*.

2.1 Pré-processamento e filtragem da nuvem de pontos

Inicialmente, os dados *LiDAR* compactados no formato *.laz* são descompactados para *.las* e processados com as ferramentas do *LAStools*. Aplica-se um filtro de classificação para isolar exclusivamente os pontos de terreno, eliminando vegetação, edificações e demais classes. A partir dessa nuvem filtrada, geram-se os MDTs correspondentes aos dois períodos a serem comparados.

2.2 Construção do polígono de análise e interpolação altimétrica

Com base nos MDTs, localiza-se o ponto de menor cota, que serve como origem do polígono de análise. Isso se deve ao fato de que esse ponto tende a alinhar os perfis na direção mais representativa dos movimentos gravitacionais típicos de escorregamentos. A partir de parâmetros como largura e direção (azimute), define-se a geometria do polígono, usada para recortar a área de interesse em ambas as nuvens. Sobre esse recorte, traçam-se perfis longitudinais, sobre os quais se aplica a interpolação altimétrica, permitindo reconstruir a superfície do terreno em cada época.

2.3 Análise multitemporal e cálculo da variação altimétrica

Com os perfis interpolados, realiza-se a análise comparativa ponto a ponto, gerando valores diferenciais que representam a variação altimétrica entre os períodos. Para suavizar ruídos e realçar zonas de interesse, aplica-se um filtro baseado em gradientes, que se representa uma média móvel da variação altimétrica entre pontos consecutivos. Essa filtragem reduz a influência de elementos indesejáveis, como vegetações residuais, e destaca alterações mais relevantes na topografia.

2.4 Variação direcional e método radial adaptativo

Para estender a cobertura direcional da análise, o procedimento é repetido em várias direções, executando-se uma varredura radial em torno do ponto de referência. Para lidar com a variação de densidade dos pontos, mais elevada no centro e decrescendo com a distância, adota-se um modelo radial adaptativo. Nesse modelo, a área é segmentada em zonas concêntricas, ajustando os parâmetros de varredura conforme a distância ao centro. Essa abordagem garante uma distribuição espacial mais equilibrada e maior uniformidade nos resultados.

2.5 Geração de produtos e visualização geoespacial

Os resultados parciais incluem dois tipos de gráficos auxiliares: um com os perfis altimétricos comparativos e outro com a variação do gradiente ao longo dos perfis. Além disso, os dados são convertidos em arquivos vetoriais no formato KML, possibilitando a visualização em plataformas como o Google Earth. Cada ponto é representado por uma coloração que expressa a magnitude da variação altimétrica. A escala cromática destaca regiões de aumento, diminuição ou estabilidade na cota. Mapas adicionais são gerados para realçar áreas onde os gradientes médios ultrapassam um limiar crítico predefinido, indicando zonas de maior atenção.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

A seguir, apresentam-se os principais resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta. A Figura 2 ilustra o fluxo de trabalho, desde o pré-processamento até a geração dos produtos. Em especial, a Figura 2.c destaca a sobreposição de perfis altimétricos em diferentes épocas, evidenciando deslocamentos no terreno, enquanto a Figura 2.d apresenta os gradientes altimétricos calculados para o mesmo perfil.

Na Figura 2.f é exibido o produto georreferenciado, no qual os pontos processados foram convertidos em arquivos KML, com coloração proporcional à variação altimétrica. O gradiente cromático adotado associa o vermelho à redução de cota, o verde à estabilidade ou variações mínimas e o azul a elevações do terreno. Essa codificação favorece a interpretação visual dos resultados e realça as regiões com maior alteração. Além do suporte à análise técnica, os mapas interativos podem contribuir para a comunicação dos riscos a equipes de campo.

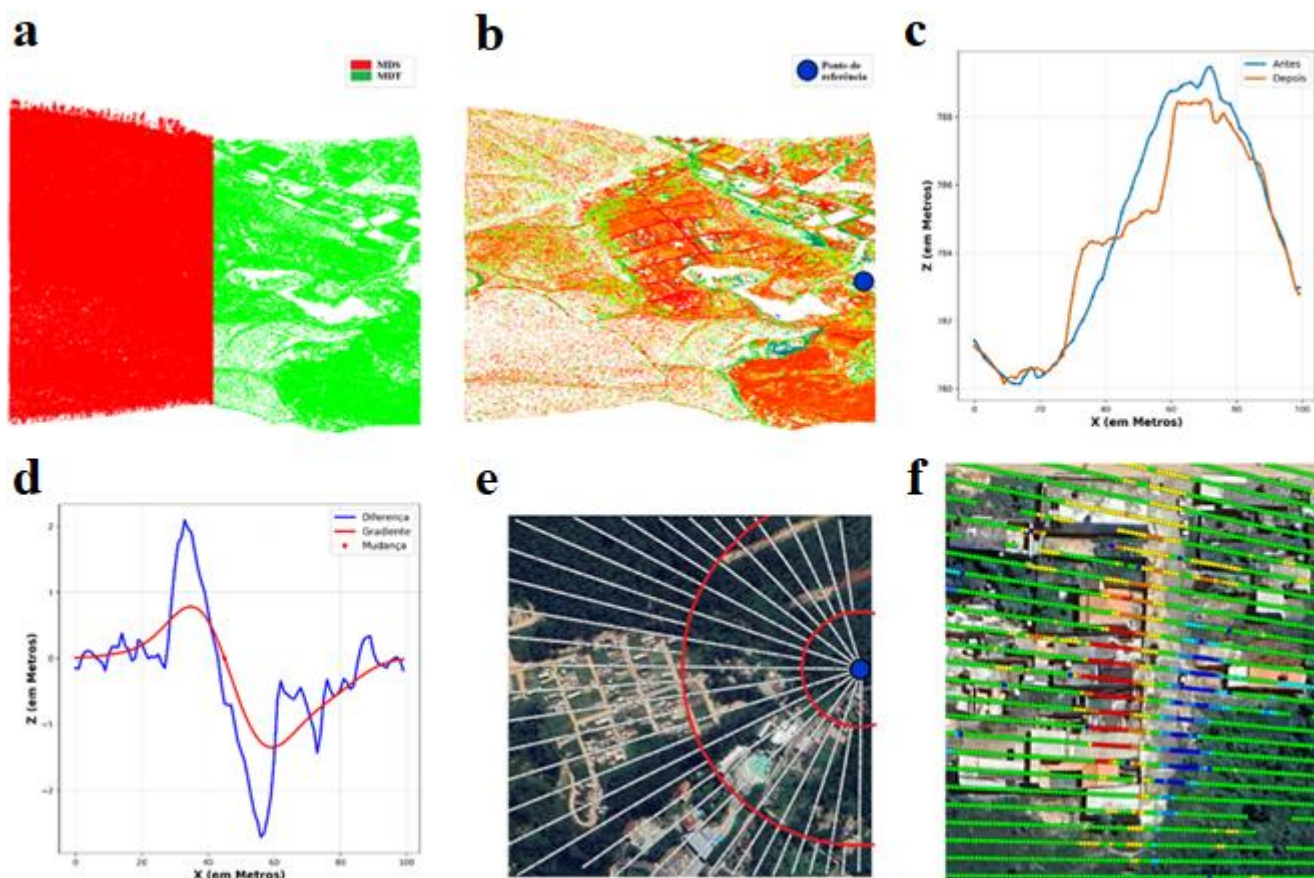


Figura 2 – Etapas do fluxo de trabalho. (a) Filtragem do MDS para obtenção do MDT; (b) Definição automática do ponto de referência pela menor cota; (c) Extração dos perfis e interpolação para ambos os períodos; (d) Cálculo da variação altimétrica e aplicação de gradientes; (e) Varredura com o método radial adaptativo; (f) Geração do produto georreferenciado com codificação cromática da variação.

A coerência dos resultados com padrões descritos por Barbarella e Lugli (2015) e Ventura *et al.* (2011) reforça a aplicabilidade da abordagem. Como discutido por Jaboyedoff *et al.* (2012), a geometria da aquisição interfere diretamente na acurácia da detecção de deslocamentos, sendo desfavorável a orientação perpendicular entre o perfil e a direção do movimento, condição que também se manifestou como limitação neste estudo.

Entre as limitações identificadas, destaca-se a qualidade do MDT em áreas com vegetação densa, onde o filtro aplicado à nuvem de pontos pode não eliminar totalmente interferências, gerando ondulações residuais nos perfis e comprometendo a fidelidade da representação altimétrica. Soma-se a isso a presença de perfis com orientação desfavorável à detecção de deslocamentos, o que reduz a representatividade dos dados e, em alguns casos, inviabiliza a análise de perfis críticos.

A aplicação do modelo radial adaptativo contribuiu para mitigar essas limitações, ao distribuir perfis em múltiplas direções e ajustar sua densidade com base na distância ao centro e na densidade de pontos. Ainda assim, o desempenho do método depende da escolha apropriada do ponto de origem, exigindo atenção especial nessa etapa.

No geral, a metodologia se mostrou eficaz para monitorar taludes urbanos, permitindo detectar variações altimétricas significativas em áreas com modificações antrópicas e histórico de risco. A combinação entre automação computacional, análise espacial e visualização interativa mostrou-se uma alternativa promissora para diagnósticos preliminares e suporte a inspeções de campo.

CONCLUSÕES:

Este trabalho apresentou uma metodologia computacional para análise multitemporal de nuvens de pontos *LiDAR*, voltada à detecção de variações topográficas em áreas urbanas suscetíveis a deslizamentos. O processo automatizado incluiu filtragem, extração de perfis altimétricos e visualização geoespacial.

Os resultados demonstraram que o método é eficaz na identificação de deslocamentos verticais, mesmo em áreas com relevo sutilmente alterado. A codificação cromática aplicada aos arquivos KML permitiu destacar zonas críticas de forma intuitiva, enquanto o modelo radial adaptativo ampliou a cobertura direcional da análise. Os gráficos de elevação e gradiente auxiliaram na interpretação quantitativa dos dados.

No entanto, limitações foram observadas em áreas com vegetação densa e em perfis orientados perpendicularmente ao movimento. Tais fatores exigem atenção na aplicação da metodologia.

Como direções futuras, sugere-se aprimorar os filtros aplicados em regiões vegetadas e incorporar parâmetros geológicos e geotécnicos à análise. A replicação do método em diferentes contextos geográficos pode fortalecer seu uso como ferramenta de apoio à gestão de riscos em encostas urbanas, especialmente em etapas preliminares às inspeções de campo.

BIBLIOGRAFIA

BARBARELLA, Maurizio; Fiani, Margherita; AND LUGLI, Andrea. Landslide monitoring using multitemporal terrestrial laser scanning for ground displacement analysis. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 6, n. 5–7, p. 398–418, 2015.

BURNS, WILLIAM J. *et al.* Analysis of Elevation Changes Detected from Multi-Temporal LiDAR Surveys in Forested Landslide Terrain in Western Oregon. **Environmental & Engineering Geoscience**, v. 16, n. 4, p. 315–341, 2010.

CEMADEN. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 A 2012**. Florianópolis, CEPED UFSC, 2013

HUNG, C. L. J. *et al.* MULTI-TEMPORAL HIGH-RESOLUTION LANDSLIDE MONITORING BASED ON UAS PHOTOGRAMMETRY AND UAS LIDAR GEOINFORMATION. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLII-3/W8, p. 157–160, 2019.

JABOYEDOFF, Michel *et al.* Use of LIDAR in landslide investigations: a review. **Natural Hazards**, v. 61, n. 1, p. 5–28, 2012.

SANTOS, Luiz Fernando Dos. **Utilização de dados 3D de alta resolução para detecção de mudanças em movimentos de massa em Perus, São Paulo (SP)**. São Paulo, Universidade de São Paulo, 2020.

VENTURA, Guido *et al.* Tracking and evolution of complex active landslides by multi-temporal airborne LiDAR data: The Montaguto landslide (Southern Italy). **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 12, p. 3237–3248, 2011.