

RECONSTRUÇÃO 3D DE BAIXO CUSTO APLICADA A AMBIENTES DE CAVERNAS

Gimena Chaves Fitzgerald¹; Vinícius Ventura²; Gabriel Vasconcelos³; Valéria Martins⁴; João Marcelo Teixeira⁵; Enrico Bernard⁶

Resumo – Cavernas são ambientes complexos sob o ponto de vista espacial, e representá-las graficamente não é uma tarefa trivial. Não obstante, modelos 3D são frequentemente necessários para a pesquisa, registro e representação destes ambientes. Recentemente, com o uso de sistemas de escaneamento a laser é possível obter representações 3D fidedignas de cavernas. Porém, os elevados custos e a difícil aquisição dos equipamentos usados para este fim limitam as possibilidades de sua utilização no país. Considerando o potencial espeleológico do Brasil, conseguir realizar mapeamentos 3D acessíveis e de baixo custo das cavidades naturais subterrâneas permitiria ampliar as documentações das cavernas do território brasileiro, adicionando possibilidades como cálculos precisos de volume e área, por exemplo. Os produtos tridimensionais também serviriam para múltiplas finalidades como licenciamento ambiental e ecoturismo, entre outras. Este artigo apresenta os resultados preliminares de modelagem 3D obtidos com uma solução de reconstrução de baixo custo em desenvolvimento, usando tecnologia de captura de dados LiDAR e soluções de reconstrução e visualização tridimensional *open source*.

Abstract – Caves are complex environments from a spatial point of view and modeling and graphically representing them is not a trivial task. 3D models are often needed for research, record and representation of these environments. Recently, with the use of laser scanning systems it has become possible to obtain reliable 3D representations of caves. However, the high costs and difficult acquisition of the equipment needed, limit the possibilities of its use in Brazil. Considering the speleological potential of the country, being able to carry out accessible, low-cost 3D reconstructions of natural underground cavities would allow the expansion of the documentation of caves in the Brazilian territory, adding new possibilities such as precise calculations of volume and area, for example. The three-dimensional products would also serve multiple purposes, such as environmental licensing and ecotourism, among others. This paper presents the preliminary 3D modeling results obtained with a low-cost reconstruction solution under development, using LiDAR technology for data capturing, and open-source, three-dimensional reconstruction and visualization solutions.

Palavras-Chave – modelagem 3D; reconstrução 3D; cavernas; LiDAR; reconstrução de baixo custo.

¹ Geól., Voxar Labs, Centro de Informática, Universidade Federal de Pernambuco: Recife - PE, (31) 9776-1631, mgc@cin.ufpe.br

² Est. Eng., Voxar Labs, Centro de Informática, Universidade Federal de Pernambuco: Recife - PE, (81) 9617-1554, vlv2@cin.ufpe.br

³ Est. Eng., Voxar Labs, Centro de Informática, Universidade Federal de Pernambuco: Recife - PE, (86) 9528-6060, jgav@cin.ufpe.br

⁴ Est. PhD, Voxar Labs, Centro de Informática, Universidade Federal de Pernambuco: Recife - PE, (63) 99934-9204, vms6@cin.ufpe.br

⁵ Eng., PhD, Voxar Labs, Centro de Informática, Universidade Federal de Pernambuco: Recife - PE, (81) 8739-6388, jmxnt@cin.ufpe.br

⁶ Biól., PhD, Laboratório de Ciência Aplicada à Conservação da Biodiversidade, Departamento de Zoologia, Universidade Federal de Pernambuco: Recife - PE, (81) 9415-8148, enricob2@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

As cavernas são aberturas naturais no terreno estendidas além do alcance da luz natural, resultantes de diversos processos geológicos em certos tipos de rochas (Davies & Morgan, 1991; Tarbuck *et al.*, 2005). Estas geoformas apresentam uma ampla variedade de tamanhos, formatos e estruturas decorrentes de vários e diferentes processos, gerando frequentemente ambientes irregulares e complexos, cuja documentação e representação sempre foram um desafio para a ciência. Além dessas variedades morfológicas, as cavernas muitas vezes se acham escondidas da vista, aparecendo ocultas em mapas topográficos, fotografias aéreas e imagens de satélite (Kambesis, 2007).

Embora o interesse dos seres humanos pelas cavernas venha desde tempos pré-históricos e a sua importância para o meio ambiente e arqueologia sejam indiscutíveis (Davies & Morgan, 1991; Piló & Auler, 2011), as dificuldades para a representação fidedigna desses ambientes é um problema descrito por diversos autores (Buckley *et al.*, 2008; Gally *et al.*, 2005; Grohmann *et al.*, 2019; Kambesis, 2007). Este desafio se relaciona com as complexidades geométricas, a muitas vezes limitada acessibilidade e a condição de frequente ausência de luz nesses locais (Kambesis, 2007). Como mencionam Gally *et al.* (2015), as técnicas tradicionais de levantamento topográfico podem não ser adequadas para o mapeamento de alta resolução de cavernas, sendo necessária a pesquisa e aplicação de outras tecnologias.

Recentemente, técnicas de mapeamento 3D vêm sendo utilizadas com essa finalidade. O estudo em detalhe da morfologia dos ambientes espeleológicos permite melhor entender e gerenciar estes espaços, importantes tanto em termos acadêmicos e educativos, como turísticos e de preservação de patrimônio, entre outros. A fragilidade destas áreas, tanto pelas formações rochosas que as constituem, como pela biodiversidade que se abriga nelas e os materiais arqueológicos muitas vezes presentes, muitas vezes exige técnicas de estudo remotas para minimizar o impacto gerado. A modelagem 3D possibilita tanto o estudo qualitativo como também quantitativo destes espaços. As soluções tecnológicas não invasivas de captura de dados tridimensionais que podem ser utilizadas possibilitam, entre outras coisas, a coleta de informações em áreas de difícil acesso e a identificação de objetos não facilmente reconhecíveis a olho nu (Cosso *et al.*, 2014; Fabbri *et al.*, 2017). Locais que abrigam cavernas em seus limites, como parques e reservas, poderiam ser beneficiados por iniciativas de mapeamento tridimensional destes ambientes e de suas características específicas, potencializando ações de pesquisa, de documentação de atributos de espeleotemas sensíveis, e de potencialização de novas formas de interação entre turistas e as cavidades naturais nestes locais.

Entretanto, embora já existam disponíveis no mercado soluções de mapeamento 3D adequadas para a representação de cavernas, o preço destes equipamentos - frequentemente na ordem de centenas de milhares de reais - é um fator impeditivo para a ampla disseminação do uso destas técnicas. O preço e a dificuldade de aquisição destes equipamentos fazem com que geralmente estes fiquem restritos a grandes empresas privadas ou consultorias de maior porte, impedindo que usuários externos tenham acesso a este recurso. Considerando que o Brasil tem um enorme potencial espeleológico, disseminar técnicas e abordagens de baixo custo para o mapeamento 3D de cavernas ampliaria em muito a possibilidade de documentação destes ambientes por parte de espeleólogos amadores e profissionais que não dispõem de recursos ou acesso aos equipamentos tradicionais. A existência de um equipamento de baixo custo, portátil e simples, permitiria que, por exemplo, espeleólogos ou outros profissionais uma vez dentro da caverna pudessem digitalizar feições, partes ou espeleotemas específicos, registrando e documentando estes objetos e feições.

O presente artigo visa apresentar o avanço no desenvolvimento de uma solução de baixo custo combinando hardware e software capaz de capturar informações sobre a estrutura tridimensional de cavernas e permitir sua posterior visualização, assim como a extração de informações adicionais como volume e área da mesma. Após esta seção 1 de introdução do problema e sua justificativa, este artigo está estruturado da seguinte maneira: na seção 2 descreve-se a metodologia aplicada para alcançar o objetivo de pesquisa proposto; os resultados da

execução de ensaios com a captura de dados e reconstrução 3D são apresentados na seção subsequente; por fim, a seção 4 apresenta uma discussão sobre os resultados e na seção 5, acha-se a conclusão detalhando os próximos passos desta pesquisa.

2. METODOLOGIA

A reconstrução tridimensional consiste em 3 grandes etapas (Buckley *et al.*, 2008): (1) captura de dados; (2) processamento dos dados coletados e criação da malha reconstruída, e (3) visualização e interpretação dos resultados.

2.1 Captura de dados

Existem diferentes soluções de captura de dados 3D que podem ser adotadas, sendo principalmente a tecnologia de natureza laser LiDAR (*Light Detection and Ranging*, também chamada *Laser Scanning*) a mais amplamente utilizada. Os sensores LiDAR baseiam-se na emissão de feixes de laser com centenas de milhares de pulsos por segundo, os quais, ao refletir na superfície a ser mapeada, voltam para o sensor. Deste modo, consegue-se uma nuvem de pontos com suas coordenadas X, Y, Z de alta resolução, a partir da qual é possível reproduzir digitalmente de forma fidedigna o ambiente em estudo.

A grande utilização desta ferramenta na Geologia em geral e, no estudo de cavernas em particular, explica-se na rapidez de aquisição de grandes quantidades de dados e a resolução espacial e precisão sem precedentes, tornando-a um complemento importante nas atividades dos geólogos de campo: os modelos em três dimensões altamente realistas obtidos com este instrumento possibilitam, entre outras coisas, a visualização de áreas inacessíveis fisicamente e a extração de informações qualitativas e quantitativas dos lugares mapeados (Bellian *et al.*, 2005; Buckley *et al.*, 2008; Berenguer-Sempere *et al.*, 2014; Silvestre *et al.*, 2015; Fabbri *et al.*, 2017; Pukanská *et al.*, 2020). Entre as informações que podem ser extraídas dos modelos de alta resolução obtidos com sensores LiDAR estão: i) áreas e volumes, que servem para monitorar a evolução da conformação do ambiente, suscetível a mudanças com o tempo; ii) produtos cartográficos como planos e seções transversais a partir da georreferenciação do modelo; iii) correlação das informações tridimensionais com outros dados para aprofundar o conhecimento do ambiente; e iv) identificação de objetos não facilmente reconhecíveis no campo e a extração de suas medidas morfométricas, as quais, de outra maneira, não seriam possíveis de obter (Cosso *et al.*, 2014; Fabbri *et al.*, 2017).

A alta portabilidade desses sensores na atualidade também favorece sua utilização nestes ambientes de difícil permanência, onde as condições de temperatura e umidade, além da presença de lama, guano, e água pingando, podem ser prejudiciais para dispositivos eletrônicos em geral (Buchroithner *et al.*, 2009). Além disso, o fato destes sensores serem ativos representa uma vantagem em relação a outros instrumentos, já que não dependem de uma fonte de iluminação externa para a captura das informações, o que constitui um grande benefício em ambientes naturais interiores com pouca incidência da luminosidade solar. Porém, para texturizar o modelo resultante deve-se contar com fotografias digitais capturadas durante o levantamento das informações, o que implica dispor do equipamento apropriado para melhorar as condições lumínicas naturais (Bellian *et al.*, 2005; Buckley *et al.*, 2008; Gallay *et al.*, 2015).

Porém, esta solução de captura apresenta um custo proporcional à qualidade do resultado: um scanner LiDAR com alta resolução pode alcançar um custo de dezenas de milhares de dólares. Em adição ao alto custo do instrumental, a sua difícil aquisição (através de importação), restringe as possibilidades de utilização no Brasil, fazendo com que ainda não seja adotado como método convencional. Não é casual, como evidenciam Idrees & Pradhan (2016), que exista um predomínio de pesquisas de reconstrução 3D de cavernas provenientes da Europa em relação a outras partes do mundo, senão uma consequência, entre outras questões, da economia e das possibilidades de acesso aos instrumentos, pois a maioria dos fabricantes de scanner LiDAR localiza-se nesse continente.

Alternativas de menor custo estão disponíveis no mercado, tais como a câmera L515 da Intel RealSense, sensor LiDAR com câmera RGB integrada. Na escolha do instrumento apropriado,

deve-se considerar o seu alcance mínimo, já que este parâmetro define a acurácia de medições em curta distância, o que pode ser benéfico no levantamento de informações em espaços estreitos dentro da caverna; o alcance máximo é menos crítico nesse sentido, visto que frequentemente as distâncias de trabalho nestes ambientes não superam as dezenas de metros (Gallay et al., 2015). O sensor LiDAR Intel RealSense L515 conta com um alcance mínimo de 0,25 m e um alcance máximo de 9 metros e sua alta portabilidade, com um peso de 100 gramas, faz dele o menor sensor de profundidade LiDAR de alta resolução disponível no mercado, de acordo com o fabricante (Intel RealSense, 2022).

Um outro diferencial desta câmera é a simplicidade dos dados gerados a partir de sua captura e a possibilidade de uso em conjunto com um celular *smartphone*. A câmera gera apenas um arquivo, com extensão .bag, diretamente no *smartphone* com frames coloridos e de profundidade, onde a própria Intel disponibiliza um SDK para extrair os dados deste arquivo e os manipular com facilidade. Devido a essa simplicidade de se trabalhar e de manipular os dados gerados, este sensor foi escolhido para ser utilizado nas capturas dos dados deste trabalho.

2.1.1 Teste *in loco*

Para os testes necessários, a captura de dados *in loco* foi realizada em uma gruta artificial, a Gruta Nossa Senhora de Lourdes, ou Gruta de Lourdes, situada no bairro de Apipucos, em Recife, Pernambuco (Figura 1).

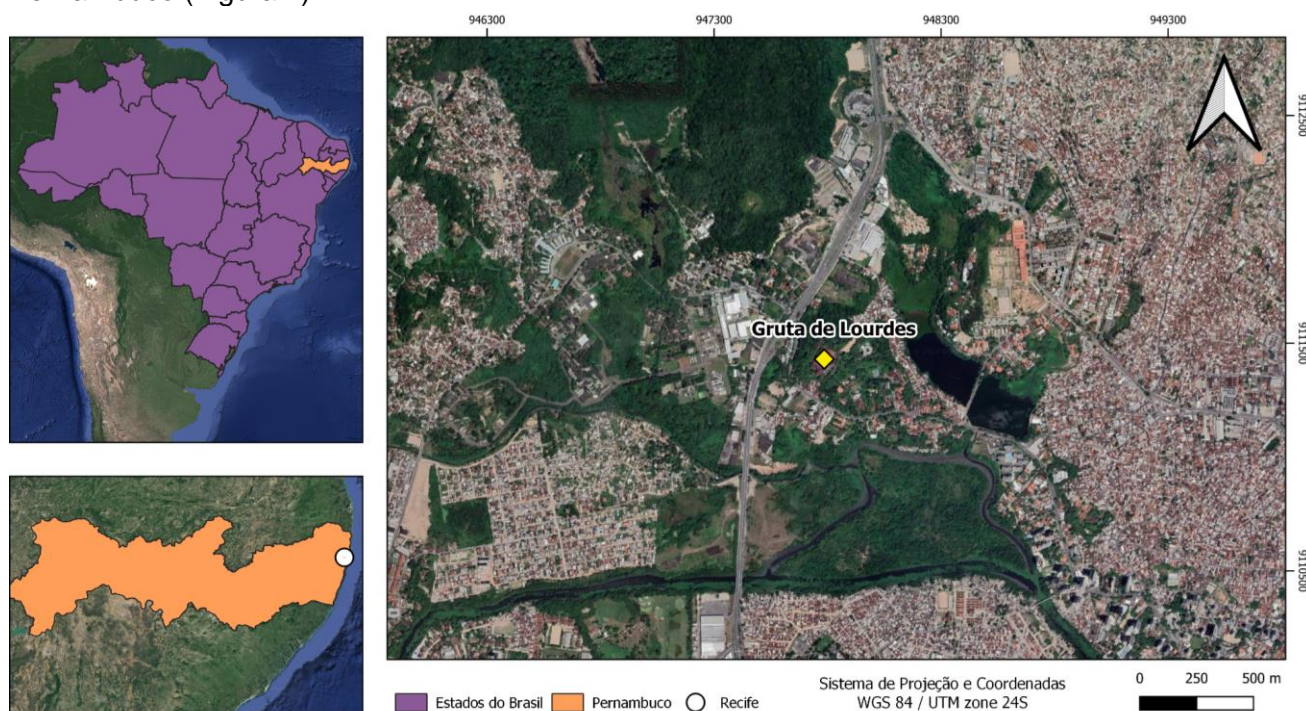


Figura 1. Localização da Gruta de Lourdes no Recife.

A gruta está localizada a uma latitude e longitude de 8.02° S e 34.94° W respectivamente (Figura 2). O lugar, por sua vez, encontra-se em uma altitude relativamente elevada em relação aos seus arredores (aprox. 40 m em relação ao nível do mar). Não obstante à presença de elevada incidência de raios solares pelo período da manhã, a configuração de uma “mata” relativamente densa com árvores de grande porte termina por prover diferentes tipos de iluminação ao longo da área capturada.

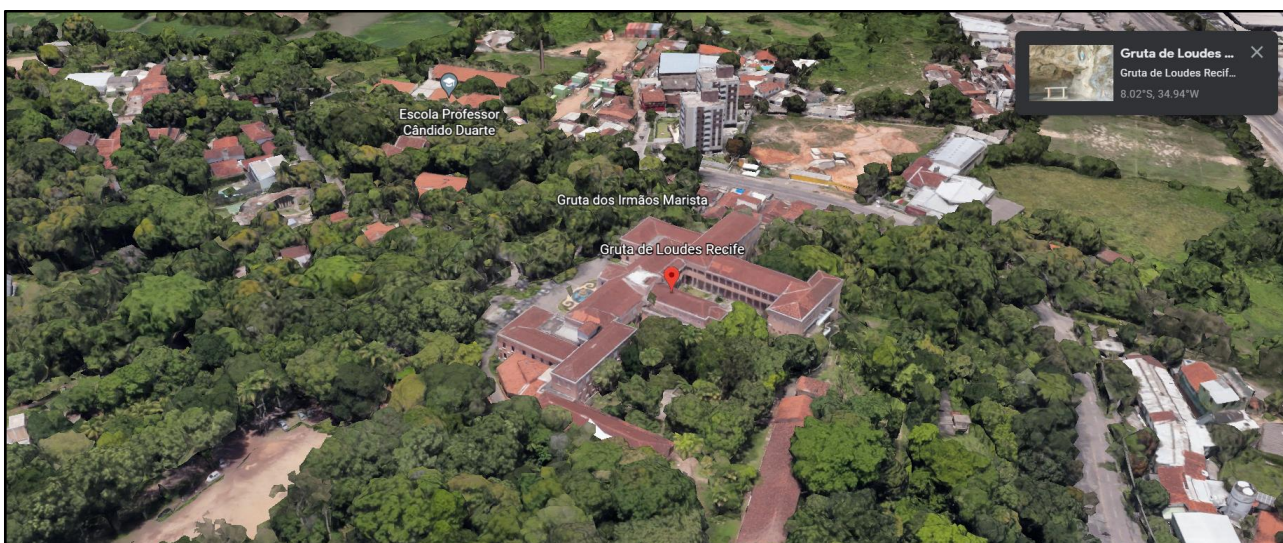
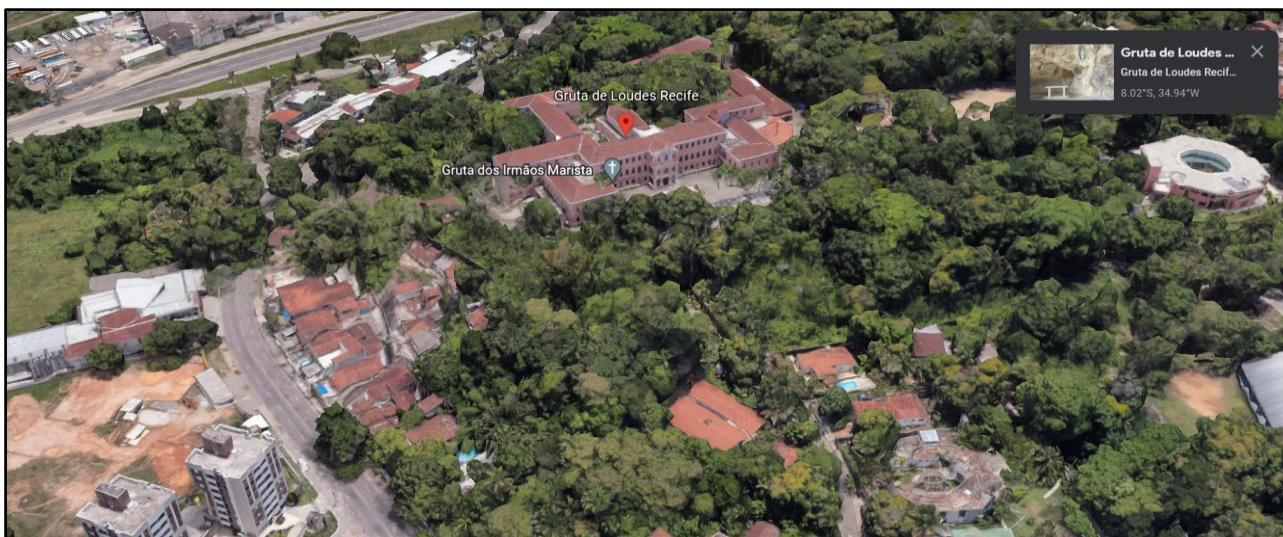


Figura 2. Vista aérea da localização da Gruta de Lourdes (Google Earth).

Em relação às capturas realizadas, escolheu-se um horário em que a presença de luz solar ainda fosse notória (aprox. 9h, pela manhã). A estrutura da gruta, por sua vez, apresenta uma profundidade relativamente considerável, o que permitiu analisar o comportamento das capturas tanto em porções com iluminação intensa (na parte externa) quanto em porções que não eram tão iluminadas (na área interna). O quesito da profundidade também possibilitou a avaliação do modelo quanto a capturas feitas tanto de curtas como de longas distâncias (visto que, muitas vezes, existem áreas de difícil acesso que necessitam de um manuseio mais delicado a fim de possibilitar a captura dos dados) (Figura 3).

Por se tratar de um ambiente mais natural (apesar de ter sido montado artificialmente), a presença de formas de erosão, acúmulo de substâncias orgânicas e outros fatores físicos ou químicos, permitiram a formação das mais variadas texturas e colorações na estrutura, o que define um parâmetro benéfico para o modelo (que tende a não se comportar corretamente em ambientes muito artificiais, visto que as texturas homogêneas afetam o modelo negativamente) (Figura 4).



Figura 3. Captura dos dados com a câmera Intel RealSense LiDAR L515.



Figura 4. Gruta de Lourdes.

2.2 Reconstrução 3D e visualização do cenário construído

Após a captura de dados, estes devem ser processados computacionalmente em laboratório para construir uma malha 3D que permita sua visualização e interpretação. A solução escolhida para este propósito, com licença para uso livre (*open source*) e a existência de um repositório contendo seu código-fonte, foi o Open3D (Open3D, 2022; GitHub, 2022). Esta solução de reconstrução é uma biblioteca de código aberto que permite trabalhar com dados tridimensionais obtidos com LiDAR. Está disponível tanto na linguagem de programação C++ como em Python, ambas linguagens amplamente conhecidas e utilizadas neste contexto. Esta solução de reconstrução apresentou resultados satisfatórios nos ensaios preliminares realizados, com melhor definição em objetos, paredes e estruturas geométricas em comparação com outras técnicas testadas, além de tempos de execução com bom desempenho.

Já para a visualização do modelo 3D, foi escolhido o software MeshLab. Esta solução é também adotada por Gallay *et al.* (2015), Silvestre *et al.* (2015) e Idrees & Pradhan (2019) na geração de modelos tridimensionais de cavernas a partir da nuvem de pontos obtida com sensores *Laser Scanners* previamente manipulada em outro programa (geralmente do próprio fabricante do dispositivo de captura). A escolha deste software de visualização no presente trabalho baseou-se na sua gratuidade, sua compatibilidade com diversos sistemas operacionais, e na possibilidade de trabalhar com os formatos mais comuns de malhas/nuvens de pontos tridimensionais resultantes das soluções de reconstrução.

3. RESULTADOS

Os resultados apresentados nas Figuras 6, 7 e 8 correspondem a três reconstruções independentes realizadas com os dados capturados da gruta, e foram obtidos com um computador com as seguintes características:

- CPU: Intel i7-6820HK @ 3.600GHz;
- RAM: 16 GB DDR4 @ 2667 MHz;
- GPU: NVIDIA GeForce GTX 980M (8GB);
- Sistema Operacional: Ubuntu 18.04 LTS x86_64;
- Disco: SSD NVMe GamerKing 1TB.



Figura 6. Reconstrução número 1 da Gruta de Lourdes.

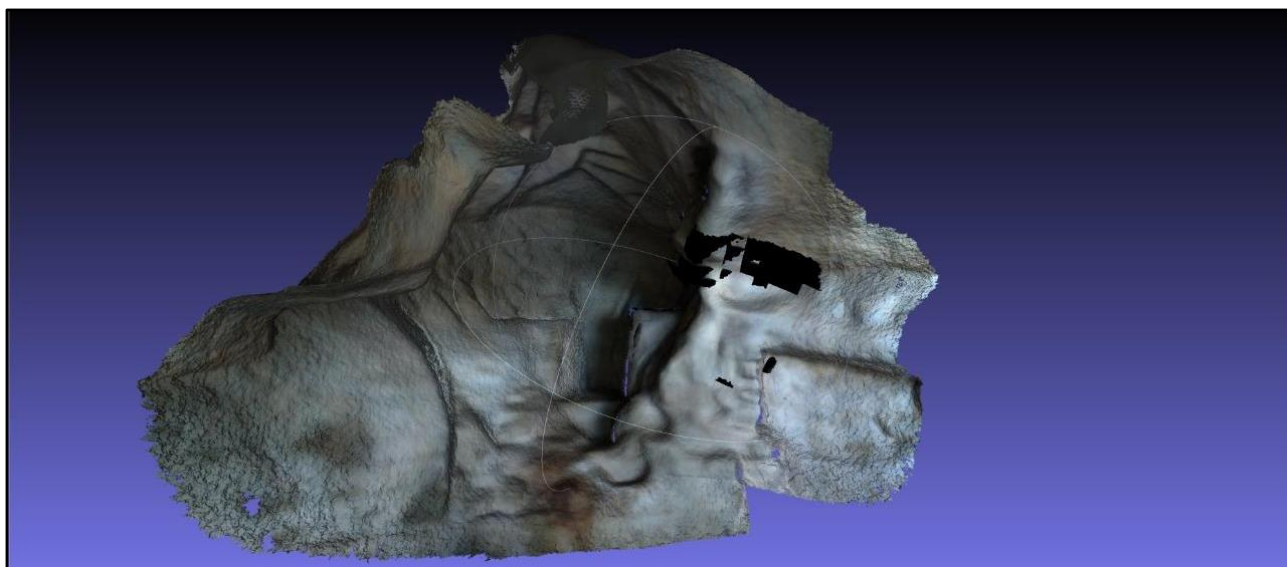


Figura 7. Reconstrução número 2 da Gruta de Lourdes.

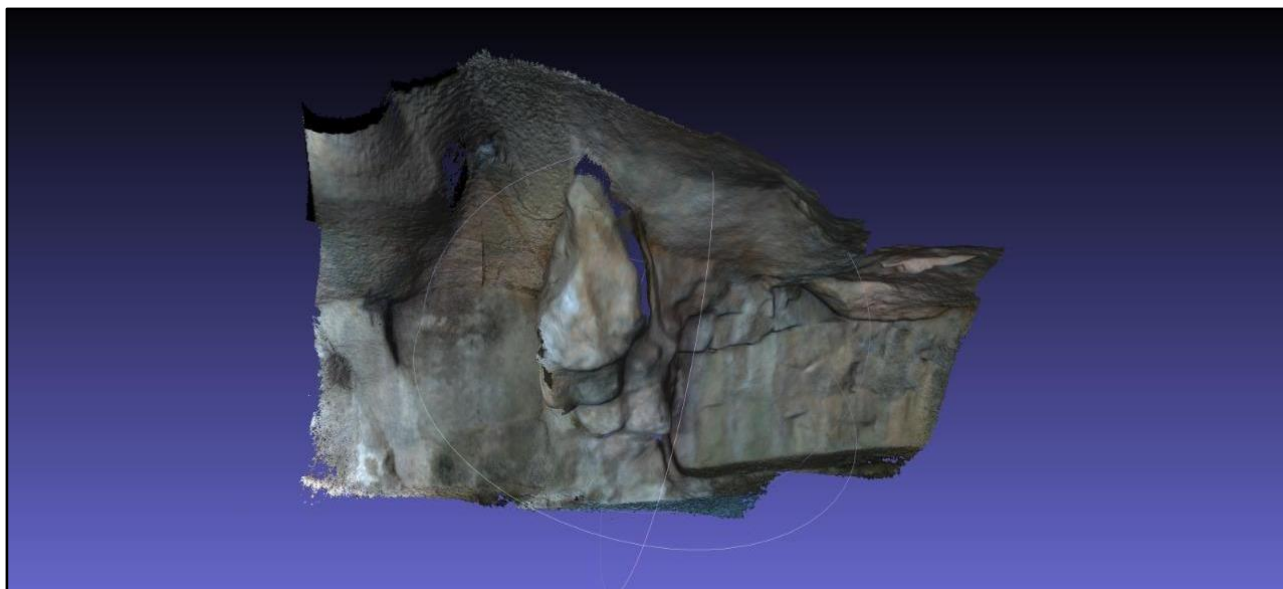


Figura 8. Reconstrução número 3 da Gruta de Lourdes.

Os tempos de processamento para a obtenção das reconstruções são apresentados na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1. Tempo de processamento das três reconstruções geradas.

Reconstrução	Tempo de processamento (min)
Reconstrução 1	25:08.3230
Reconstrução 2	17:44.773
Reconstrução 3	06:46.051

4. DISCUSSÃO

Para se atingir o nível de detalhes apresentado nas reconstruções, foram precisos alguns cuidados no momento da captura, como não mover a câmera muito lentamente à medida que se faz a filmagem, pois o algoritmo de reconstrução pode não conseguir identificar as referências entre os frames da filmagem devido à similaridade das texturas e cores da paredes da gruta; não manter o sensor a uma distância muito grande da superfície, pois o LiDAR tem um limite de distância para conseguir capturar - em ambientes onde o teto é muito alto, uma possível solução pode ser a utilização de um *selfie stick* para estender o sensor até a distância mínima necessária para a captura; também, é necessário que o ambiente esteja iluminado. Portanto, para ambientes onde a iluminação natural não seja favorável, faz-se preciso o uso de iluminação artificial para captura dos dados, para que assim a reconstrução possa obter êxito.

5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, a solução em desenvolvimento se mostra promissora pela sua simplicidade, já que a solução consiste unicamente no sensor LiDAR Intel RealSense L515 acoplado a um celular *smartphone* de uso pessoal. Além disso, a sua facilidade de utilização permite que usuários não especializados possam fazer uso sem necessidade de treinamentos complexos. Em adição, o seu custo, que implica somente à aquisição da câmera Intel RealSense L515 com um valor de mercado de USD 589, amplia as possibilidades de uso deste tipo de tecnologia no mapeamento de cavernas no país.

A partir do apresentado, conclui-se que os resultados obtidos nos ensaios apresentados neste trabalho representam contribuições relevantes para a pesquisa em construção, a qual visa possibilitar a reconstrução 3D de cavernas com baixo custo. As observações realizadas nos ensaios

serão insumo para as próximas etapas de aperfeiçoamento da solução, tanto nas etapas de captura, processamento e reconstrução 3D, até que possam ser realizados novos ensaios em ambientes reais de cavernas e, assim, encaminhar-se a uma solução viável de aplicação desses cenários.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas - CECAV, do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), pelo fomento à pesquisa através de recursos de compensação espeleológica (TCCE n. 02/2020/ICMBio, processo n. 02667.000022/2020-13), e ao Voxar Labs, do Centro de Informática da UFPE.

REFERÊNCIAS

- BELLIAN, J. A., KERANS, C., JENNETTE, D. C., 2005. *Digital Outcrop Models: Applications of Terrestrial Scanning Lidar Technology in Stratigraphic Modeling*. Journal of Sedimentary Research 2005; 75 (2): 166–176.
- BERENGUER-SEMPERE, F. et al., 2014. *Orthothermographies and 3D models as potential tools in ice cave studies: the Peña Castil Ice Cave (Picos de Europa, Northern Spain)*. International Journal of Speleology, 43 (1), 35-43, Tampa, USA.
- BUCHROITHNER, M. F., et al., 2009. *Terrestrial laser scanning for the visualization of a complex dome in an extreme Alpine cave system*. Photogramm. Fernerkun, 4, 329–339.
- BUCKLEY, S. J. et al., 2008. *Terrestrial laser scanning in geology: data acquisition, processing and accuracy considerations*. Journal of the Geological Society 165:625- 638.
- COSSO, T., FERRANDO, I., ORLANDO, A., 2014. *Surveying and mapping a cave using 3d laser scanner: the open challenge with free and open-source software*. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XL-5, 181–186.
- DAVIES, W. E., MORGAN, I. M., 1991, *Geology of Caves*. U. S. Geological Survey, United States Department of the Interior, 19 p.
- FABBRI, S., SAURO, F., SANTAGATA, T., ROSSI, G., DE WAELE, J., 2017. *High-resolution 3-D mapping using terrestrial laser scanning as a tool for geomorphological and speleogenetical studies in caves: An example from the Lessini mountains (North Italy)*. Geomorphology, 280, 16-29.
- GALLAY, M. et al., 2015. *Large-scale and high-resolution 3-D cave mapping by terrestrial laser scanning: a case study of the Domica Cave, Slovakia*. International Journal of Speleology 44: 277-291.
- GITHUB. Open 3D. Disponível em <<https://github.com/intel-isl/Open3D>>. Acesso em 24 abr. 2022.
- GROHMANN C. H. et al., 2019. *Mapeamento e modelagem 3D do setor turístico da Caverna do Diabo (SP) com laser scanner: resultados preliminares*. In: Zampaulo R. A. (org.) Congresso Brasileiro de Espeleologia 35, Bonito. Anais 35. Campinas: SBE, 2019. pp. 201-206.
- Idrees M. O., Pradhan B., 2016. *A decade of modern cave surveying with terrestrial laser scanning: A review of sensors, method and application development*. International Journal of Speleology, 45 (1), 71-88, Tampa, USA.
- IDREES M. O., PRADHAN B., 2019. *Frontier in Three-Dimensional Cave Reconstruction—3D Meshing Versus Textured Rendering*. In: Pradhan B. (eds) GCEC 2017. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 9, Springer, Singapore.
- INTEL REALSENSE. LiDAR Camera L515. Disponível em <<https://www.intelrealsense.com/lidar-camera-l515/>>. Acesso em 24 abr. 2022.
- KAMBESIS, P., 2007. *The importance of cave exploration to scientific research*. Journal of Cave and Karst Studies, v. 69, no. 1, pp. 46–58.

OPEN3D. Disponível em <<http://www.open3d.org/>>. Acesso em 24 abr. 2022.

PILÓ, L. B., AULER, A., 2011. *Introdução à Espeleologia*. In: CECAV. III Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental. Brasília: CECAV/Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2011. Cap. 1, p. 7-23

PUKANSKÁ, K. et al., 2020. *Surveying and high-resolution topography of the ochtíná aragonite cave based on TLS and digital photogrammetry*. Applied Sciences, 10 (13), 4633.

SILVESTRE I., RODRIGUES J.I., FIGUEIREDO M. AND VEIGA-PIRES C., 2014. *High-resolution digital 3D models of Algar do Penico Chamber: limitations, challenges, and potential*. International Journal of Speleology, 44 (1), 25-35. Tampa, USA.

TARBUCK, E. J., LUTGENS, F. K., TASA, D., 2005. *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la Geología Física. 8a Edición*. Pearson Prentice Hall, Madrid, 736 p.