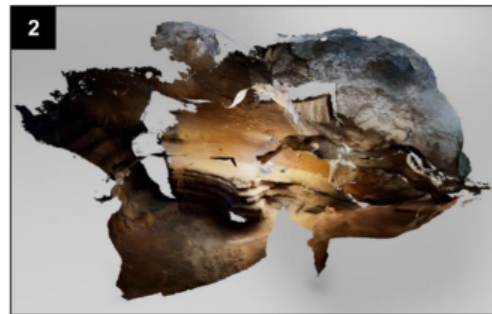
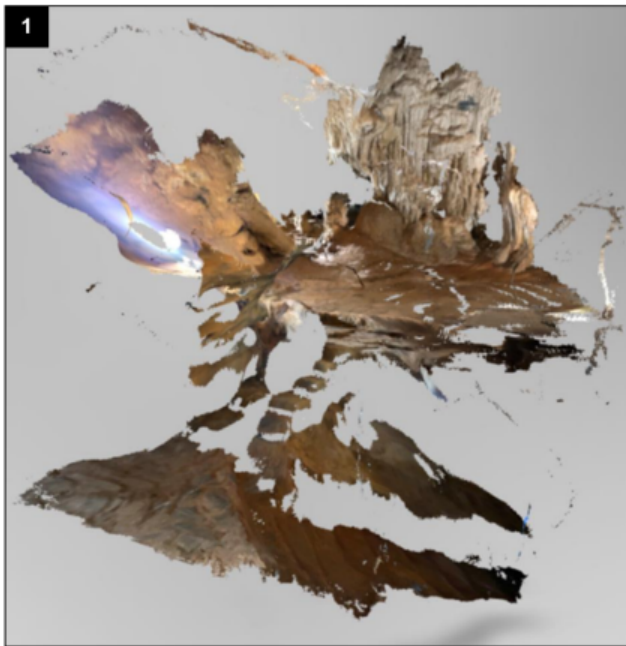


RELATÓRIO FINAL

Modelagem 3D de cavidades naturais subterrâneas



Introdução

Devido à complexidade espacial de cavidades naturais subterrâneas (cavernas), os pesquisadores e profissionais da área enfrentam problemas como: alto custo das atuais tecnologias, dificuldade no acesso aos equipamentos, pois muitos são importados ou com uso restrito por razões militares ou de segurança, e as atuais tecnologias geram um volume de dados gigantesco, tornando necessário o uso de computadores com alto poder de processamento. Por isso, este projeto de pesquisa apresenta uma análise de três alternativas de reconstrução acessíveis existentes e seu completo processo de aplicação para captura de dados, processamento, visualização, área e estimativa de volume.

Estrutura do Relatório

Na seção de Metodologia há a apresentação do planejamento das diferentes etapas da execução da pesquisa, dividido de acordo com os períodos de tempo.

Na seção de Pesquisa foram incluídos todos os documentos relacionados à fase de pesquisa como artigos lidos que auxiliaram na formulação de hipóteses e definição do objetivo, pesquisa de campo e experimentos iniciais.

A seção de Resultados é referente a todos os resultados que foram produzidos ao final da pesquisa. Inclui a dissertação, artigos publicados bem como os experimentos finais.

Por fim, a seção de Conclusão realiza um fechamento de tudo o que foi produzido ao longo dos dois anos de projeto.

Uma versão digital deste relatório final pode ser encontrada em:

<https://sites.google.com/cin.ufpe.br/r3dcav>

Metodologia

Cronograma

| TÍTULO DA TAREFA | DATA DE INÍCIO | DATA DE CONCLUSÃO | DURAÇÃO | % DA TAREFA CONCLUÍDA | 06/2 | 07/2 | 08/2 | 09/2 | 10/2 | 11/2 | 12/2 | 01/2 | 02/2 | 03/2 | 04/2 | 05/22 |
|--|----------------|-------------------|---------|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| | | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 05/22 |
| Investigação de soluções de captura | 01/06/21 | 30/06/21 | 29 | 100% | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S |
| Análise e catalogação das soluções para captura de dados | 01/07/21 | 31/07/21 | 30 | 100% | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S |

| | | | | | |
|---|----------|----------|----|------|--|
| Lista descritiva e comparativa de soluções de captura | 26/07/21 | 31/07/21 | 5 | 100% | |
| Investigação de técnicas de reconstrução 3D | 01/08/21 | 31/08/21 | 30 | 100% | |
| Análise e catalogação das técnicas de reconstrução | 01/09/21 | 30/09/21 | 29 | 100% | |
| Lista de técnicas de reconstrução 3D | 23/09/21 | 30/09/21 | 7 | 100% | |
| Investigação de soluções de visualização 3D | 01/10/21 | 31/10/21 | 30 | 100% | |
| Análise e catalogação de soluções de visualização 3D | 01/11/21 | 30/11/21 | 29 | 100% | |
| Lista de técnicas de soluções de visualização 3D | 23/11/21 | 30/11/21 | 7 | 100% | |
| Estudo da Lidar Intel RealSense L515 | 01/12/21 | 31/12/21 | 30 | 100% | |
| Testes iniciais com Lidar Intel RealSense L515 + Open3D | 20/12/21 | 31/01/22 | 41 | 100% | |

Pesquisa

A primeira fase da pesquisa foi composta pelo estudo dos softwares e sensores existentes. As áreas da pesquisa foram divididas em: 1) Soluções para capturas de dados, 2) Soluções de reconstrução 3D e 3) Soluções de visualização 3D.

As listas detalhadas podem ser observadas a seguir:

Tabela 1. Soluções para captura de dados: Sensores.

| SENSORES | | | |
|--|-------|--|------------|
| Nome | Tipo | Vantagens (+) / Desvantagens (-) | Valor |
| 1. Plataforma de laser scanner terrestre | TLS | (+) Velocidade de coleta de dados e alto nível de detalhamento dos objetos/feições, maior velocidade de aquisição e precisão compatível com serviços de engenharia. (-) Dependência de uma via para que o veículo possa trafegar, no caso do escaneamento móvel; alto custo dos equipamentos e softwares; necessidade de mão de obra mais qualificada; quantidade muito grande de dados e volume de arquivos, exigindo equipamentos sofisticados. | \$10k-120k |
| 2. Kinect v2 | RGB-D | (+) Baixo preço, alta portabilidade, permite SLAM. (-) Erros na captura de dados relacionados à refletividade dos objetos e a iluminação do ambiente. Precisão. | \$200 |
| 3. Azure Kinect DK | RGB-D | (+) Leve (440 g) e de dimensões pequenas (103 x 39 x 126 mm). Maior resolução que Kinect v2. (-) Preço mais elevado que outras câmeras RGB-D. | \$1.000 |
| 4. Intel RealSense Depth Camera D455 | RGB-D | (+) Menos de 2% de erro na medição da profundidade a 4 m. Utiliza software de código aberto SDK 2.0 da Intel RealSense. (-) Exposição ao óxido de Antimônio, substância considerada cancerígena no estado da Califórnia. | \$250 |
| 5. Intel RealSense LiDAR Camera L515 | LiDAR | (+) Portabilidade e baixo preço. Baixo consumo de bateria. Utiliza o software de código aberto SDK 2.0 da Intel RealSense. (-) Exposição ao óxido de Antimônio, substância considerada cancerígena no estado da Califórnia. | \$370 |
| 6. FARO | LiDAR | (+) Medições em ambientes tanto internos como externos. (-) Preço. | \$20k |

| | | | |
|---|-------------------------|--|--|
| 7. Z+F IMAGER 5010 | TLS | (+) Alcance de até 187 m. Alta precisão. (-) Peso de 9.8 kg. Preço. | \$75k |
| 8. Mapeamento 3D de grande escala e alta resolução usando TLS | TLS | (+) Alta precisão. (-) Tempo de processamento dos dados, portabilidade, preço. | ~10k-120k |
| 9. RIEGL VZ-400i | TLS | (+) Alta precisão. (-) Preço. | \$120k |
| 10. Abordagem híbrida para a criação de sistema de visualização arqueológica para uma caverna paleolítica | TLS, RGB | (+) Possibilidade de medições precisas; o usuário pode explorar a caverna virtualmente, inclusive as áreas restritas na realidade. (-) Preço do TLS. | ~\$10k-120k |
| 11. Estudo e modelagem 3D digital da geometria de caverna: Aplicação na Arte Rupestre Paleolítica | TLS, RGB, Estação Total | (+) Precisão, capacidade de modelar artes rupestres complexas. (-) Preço do equipamento, processamento de dados complexo. | TLS ~\$10k Estação total ~\$1k-3k |
| 12. Artec Leo | LiDAR | (+) Reconstrução com 80 quadros/segundo 3D faz deste sensor o mais rápido dos sensores 3D portáteis do mercado; o usuário pode acessar o dispositivo mais perto do objeto para obter maior detalhamento. (-) Preço. | ~\$30K |
| 13. Artec Ray | LiDAR | (+) Alcance de 110 m. (-) Precisa ficar fixo para fazer a captura de dados. Preço. | \$60k |
| 14. POP 3D portable scanner | RGB-D | (+) Baixo preço. Software disponível gratuitamente. (-) Nos exemplos no site do fabricante, somente são apresentadas reconstruções de objetos pequenos. | \$500 |
| 15. Structure Sensor Mark II | RGB-D | (+) Possibilidade de ser anexado a qualquer dispositivo (por exemplo, iPad). Portabilidade. Baixo preço. (-) Dúvidas sobre o alcance. | \$530 |

Tabela 2. Soluções para captura de dados: Soluções completas.

| SOLUÇÕES COMPLETAS | | | |
|--------------------|------------------|---|------------|
| Nome | Tipo | Vantagens (+) / Desvantagens (-) | Valor |
| 1. Caveatron | Solução completa | (+) Hardware open source e software disponível gratuitamente; possui sensor LiDAR e uma tela touchscreen integrada; leve, barato, resistente a água e poeira. | ~\$100-400 |

| | | | |
|---|------------------|---|---------------------------------------|
| | | (-) Dependendo da velocidade com que o usuário se move, os resultados podem não ter uma boa resolução. | |
| 2. OAK-D | Solução completa | (+) Fácil de utilizar; processamento em tempo real; pode utilizar modelos de Deep Learning para classificação de imagens, detecção de objetos, segmentação, entre outras, em hosts como o Raspberry Pi. (-) Deve analisar-se a capacidade de captura em grande escala. Reconstrução baseada em câmeras estéreo é problemática. | \$199 |
| 3. Go!SCAN3D SPARK | Solução completa | (+) Produto versátil e portátil (1,25 kg). Permite a visualização da malha em tempo real. (-) Preço. | ~\$40k |
| 4. Zebedee | Solução completa | (+) Preço baseado em aluguel mensal, portátil e versátil. (-) Para iniciar o software de registro, necessita-se de um web browser em um laptop ou dispositivo móvel. | ~\$1.2k /mês; pgto. inicial ~\$9k. |
| 5. Leica BLK2GO | Solução completa | (+) Simplicidade e captura rápida. Leve (775 g). Não precisa de treinamento para ser utilizado. (-) Preço. | \$65k |
| 6. Fotogrametria com smartphone para modelagem 3D de estruturas geomorfológicas | Solução completa | (+) Utiliza smartphone; barato. (-) Iluminação é um problema na captura de dados; distância aos objetos dificulta a aquisição dos dados. | ~\$200 -2000 |
| 7. PIX4Dcatch | Solução completa | (+) Captura de dados fácil e em tempo real, a partir do dispositivo móvel do usuário. (-) Preços dos planos para utilização do software. | A partir de ~\$350 /mês |
| 8. ZEB Go | Solução completa | (+) Bom alcance; portabilidade; alta compatibilidade do produto final com diferentes programas. (-) Desvantagens: Preço. | ~\$30k |

Tabela 3. Soluções de Reconstrução 3D.

| Nome | Tipo | Referências | Implementação |
|-----------|------------|---|---|
| 1. Open3D | Biblioteca | http://www.open3d.org/ Qian-Yi Zhou, Q. Y., Park, P., Koltun, V., 2018. Open3D: A Modern Library for 3D Data Processing. arXiv:1801.09847 | https://github.com/intel-isl/Open3D |

| | | | |
|---|-----------------|---|---|
| 2. Elastic Fusion | Algoritmo | Whelan, T., Salas-Moreno, R. F., Glocker, B., Davison, A. J., Leutenegger, S., 2016. ElasticFusion: Real-Time Dense SLAM and Light Source Estimation, IJRR '16. | https://github.com/mp3quy/ElasticFusion |
| 3. Quadtree Mapping | Biblioteca | Wang, K., Ding, W., Shen, S., 2018. Quadtree-Accelerated Real-Time Monocular Dense Mapping. 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 1-9, doi: 10.1109/IROS.2018.8594101. | https://github.com/HKUST-Aerial-Robotics/open_quadtree_mapping |
| 4. Kinect Fusion | Técnica isolada | Izadi, S., Kim, D., Hilliges, O., Molyneaux, D., Newcombe, R., Kohli, P., Shotton, J., Hodges, S., Freeman, D., Davison, A., Fitzgibbon, A., 2011. KinectFusion: real-time 3D reconstruction and interaction using a moving depth camera. In Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '11). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 559–568, doi: https://doi.org/10.1145/2047196.2047270 | |
| 5. RTAB- Map | Técnica isolada | | http://introlab.github.io/rtabmap/ |
| 6. 3D Modeling on the Go: Interactive 3D Reconstruction of Large- Scale Scenes on Mobile Devices | Técnica isolada | Schöps, T., Sattler, T., Häne, C., Pollefeys, M., 2015. 3D Modeling on the Go: Interactive 3D Reconstruction of Large-Scale Scenes on Mobile Devices. 2015 International Conference on 3D Vision, pp. 291-299, doi: 10.1109/3DV.2015.40. | |
| 7. Neural Recon: Real-Time Coherence | Framework | https://arxiv.org/abs/2104.00681v1 | https://zju3dv.github.io/neuralrecon/ |

| | | | |
|--|---|--|---|
| nt 3D Reconstru tion from Monoc ular Video | | | |
| 8. Colma p | Biblioteca | https://colmap.github.io/ Schonberger, J. L., Frahm, J. M., 2016. Structure-from-motion revisited. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, pp. 4104-4113. | https://github.com/colmap/colmap |
| 9. A curated list of papers & resourc es linked to 3D reconst ruction from images . | Estudo secundário | https://github.com/openMVG/awesome_3DReconstruction_list | |
| 10. A review and a compar ison of SfM tools | Estudo secundário | Jiang, S., Jiang, C., Jiang, W., 2020. Efficient structure from motion for large-scale UAV images: A review and a comparison of SfM tools. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 167, pp. 230-251, doi: https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.016. | |
| 11. BigSF M | Técnicas aplicadas por outro grupo de pesquisa | https://www.cs.cornell.edu/projects/bigsfm/ | |
| 12. Chisel: Real Time Large | Técnica isolada | Klingensmith, M., Dryanovski, I., Srinivasa, S. S., Xiao, J., 2015. Chisel: Real Time Large Scale 3D Reconstruction Onboard a Mobile Device using Spatially Hashed Signed Distance Fields. In Robotics: science and systems Vol. 4, No. 1. | |

| | | | |
|---|-----------------|--|---|
| Scale 3D Reconstruction Onboard a Mobile Device | | | |
| 13. Graph- Based Parallel Large Scale Structure from Motion | Técnica isolada | Chen, Y., Shen, S., Chen, Y., Wang, G., 2020. Graph-based parallel large scale structure from motion. Pattern Recognition, 107, 107537. | https://github.com/AIBluefisher/DAGSfM |
| 14. DI-Fusion: Online Implicit 3D Reconstruction with Deep Priors | Técnica isolada | Huang, J., Huang, S. S., Song, H., Hu, S. M., 2021. DI-Fusion: Online Implicit 3D Reconstruction with Deep Priors. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 8932-8941. | https://github.com/huangjh-pub/di-fusion |
| 15. RTSfM : Real-Time Structure From Motion for Mosaicing and DSM Mapping of Seque | Técnica isolada | Zhao, Y., Chen, L., Zhang, X., Xu, S., Bu, S., Jiang, H., Han, P., Li, K., Wan, G., 2021. RTSfM: Real-Time Structure From Motion for Mosaicing and DSM Mapping of Sequential Aerial Images With Low Overlap. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. | |

| | | | |
|--|-----------------|---|---|
| ntial Aerial Image s With Low Overla p | | | |
| 16. Theia: A Fast and Scala ble Struct ure-fro m-Mot ion Librar y | Biblioteca | Sweeney, C., Hollerer, T., Turk, M., 2015. Theia: A fast and scalable structure-from-motion library. In Proceedings of the 23rd ACM international conference on Multimedia, pp. 693-696. | https://github.com/sweeneychris/TheiaSfM |
| 17. Real-ti me 3D Recon structi on at Scale using Voxel Hashi ng | Técnica isolada | Nießner, M., Zollhöfer, M., Izadi, S., Stamminger, M., 2013. Real-time 3D reconstruction at scale using voxel hashing. ACM Transactions on Graphics (ToG), 32 (6), 1-11. | https://github.com/niessner/VoxelHashing |
| 18. Optim al 3D Recon structi on of Caves Using Small Unma nned Aerial Syste ms and RGB-D | Técnica isolada | Zhang, G., Chen, Y., Moyes, H., 2018. Optimal 3D Reconstruction of Caves Using Small Unmanned Aerial Systems and RGB-D Cameras. In 2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), pp. 410-415, IEEE. | |

| Camer as | | | |
|------------------------|-----------|---|--|
| 19. AliceV ision | Framework | Carsten Griwodz, Simone Gasparini, Lilian Calvet, Pierre Gurdjos, Fabien Castan, et al., 2021. AliceVision Meshroom: An open-source 3D reconstruction pipeline. Proceedings of the 11th Multimedia Systems Conference, Istanbul, Turkey. De Resende Filho, L. W., 2021. Robótica Móvel na Mineração: estudos de caso com robôs terrestres e aéreos em dispersão de etiquetas eletrônicas, reconstrução 3D e inspeção visual automatizada. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Controle e Automação), Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 98. | https://github.com/alicevision/AliceVision https://github.com/alicevision/meshroom |

Tabela 4. Soluções para visualização 3D.

| Software | Input | Gratuidade | Plataforma |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|-------------------|
| 1. Fast STL Viewer | .stl | Sim | Android |
| 2. STLView | .stl | Sim | Android / Windows |
| 3. Dot3D | DP Files (.dp, .dp.raw, .dpX) | Sim (versão simples) | Android / Windows |
| 4. STL Simple Viewer | .stl | Sim | iOS |
| 5. Pleasant3D | .stl, Gcode files | Sim | MAC |
| 6. MAC OS X Preview | .stl | Sim | MAC |
| 7.ViewSTL | .obj, .stl, .3mf | Sim | Web |
| 8. ShareCad | .stl e outros | Sim | Web |
| 9. JSCad | Pasta de projeto inteira | Sim | Web |
| 10. Online 3D Viewer | .obj, .stl, .ply, e outros | Sim | Web |
| 11. BR3DViewer | .obj, .stl, e outros | Sim | Web |

| | | | |
|--------------------------|---|---------------------------|-----------------------|
| 12. Foyr Neo | .stl | Não | Web |
| 13. Sketchfab | .stl | Não | Web |
| 14. Autodesk | .stl | Não | Web |
| 15. 3D-Tool Free Viewer | 3D-Tool files (.ddd), .stl (versão gratuita) | Sim | Windows |
| 16. Ada 3D | .obj, .stl e .rsm | Sim | Windows |
| 17. MiniMagics | .stl | Sim | Windows |
| 18. Microsoft 3D Viewer | .obj, .stl, .ply, e outros | Sim | Windows |
| 19. FreeCAD | .obj, .stl, e outros | Sim | Windows / MAC / Linux |
| 20. Lumion | .stl | Não | Windows |
| 21. Revit | .stl | Não | Windows |
| 22. VRAY | .stl | Não | Windows |
| 23. PointCloudViewer | Formatos de nuvens de pontos: PCD, PTX, E57, etc. | Sim | Windows |
| 24. Kohera3D | .stl | Não | Windows |
| 25. Quick Terrain Reader | .las, .laz, .qtc, entre outros | Sim (apenas visualizador) | Windows |
| 26. FugroViewer | .las, .laz, .xyz, .tif, .hdr, .img | Sim | Windows |
| 27. PointVue LE | .las (LiDAR data) | Sim | Windows |
| 28. FUSION/LDV | LiDAR data | Sim | Windows |
| 29. VRAY | .stl | Não | Windows |
| 30. PointCloudViewer | Formatos de nuvens de pontos: PCD, PTX, E57, etc. | Sim | Windows |
| 31. Kohera3D | .stl | Não | Windows |
| 32. Quick Terrain Reader | .las, .laz, .qtc, entre outros | Sim (apenas visualizador) | Windows |
| 33. FugroViewer | .las, .laz, .xyz, .tif, .hdr, .img | Sim | Windows |
| 34. PointVue LE | .las (LiDAR data) | Sim | Windows |
| 35. FUSION/LDV | LiDAR data | Sim | Windows |
| 36. SketchUp | Projetos SKP | Sim (para uso pessoal) | Windows / MAC |
| 37. Keyshot | .stl | Não | Windows / MAC |
| 38. ArchiCad | .stl | Não | Windows / MAC |
| 39. Shapspark | .stl | Não | Windows / MAC |

| | | | |
|-------------------|--------------------------------|-----|-----------------------|
| 40. PointCab | .stl | Não | Windows / MAC |
| 41. Gmsh | .stl, .ply2 e outros | Sim | Windows / MAC / Linux |
| 42. GLCPlayer | .obj, .stl e outros | Sim | Windows / MAC / Linux |
| 43. MeshLab | .obj, .ply, .stl, entre outros | Sim | Windows / MAC / Linux |
| 44. CloudCompare | .obj, .ply, .stl, entre outros | Sim | Windows / MAC / Linux |
| 45. Blender | .obj, .ply, .stl, entre outros | Sim | Windows / MAC / Linux |
| 46. Wings 3D | .obj, .ply, .stl, entre outros | Sim | Windows / MAC / Linux |
| 47. Octane Render | .stl | Não | Windows / MAC / Linux |
| 48. Cinema 4D | .stl | Não | Windows / MAC / Linux |

Iluminação em Ambientes 3D

A utilização de sensores de natureza laser na reconstrução 3D de ambientes escuros outorga independência das fontes de iluminação no levantamento dos dados. No entanto, para obter uma representação realista, que permita uma melhor visualização de detalhes para diversos fins, e inclusive, fornecer experiências imersivas e interativas de visualização com realidade virtual (VR) para, por exemplo, conservação do patrimônio natural e arqueológico (Büyüksalih et al., 2020), é preciso contar tanto com dados tridimensionais do ambiente como com suas informações de cores. Da mesma maneira, quando a captura de dados na modelagem 3D se baseia em técnicas fotogramétricas, deve-se contar com imagens digitais coloridas do espaço. Porém, os dispositivos fotográficos dependem de uma fonte de iluminação externa para a captura das imagens.

A falta de iluminação é um dos vários desafios enfrentados ao se trabalhar com ambientes escuros. Esses desafios se remontam aos tempos paleolíticos e aos primeiros habitantes dos ambientes espeleológicos. De acordo com Medina-Alcalde et al. (2021), as características físicas do sistema de iluminação com que esses grupos primitivos contavam, como a intensidade luminosa, o raio de alcance, o tipo de radiação e a temperatura de cor, limitavam as suas possibilidades de permanência nesses lugares.

A problemática da falta de iluminação se traslada até hoje, na aplicação de técnicas modernas de reconstrução 3D de ambientes espeleológicos. A ausência de luz natural dificulta a captura de dados nas reconstruções fotogramétricas, e a texturização de modelos resultantes de outros tipos de levantamento de dados, como levantamentos com laser scanners. Além disso, a baixa ou inexistente iluminação em certos setores dentro das cavernas dificulta a sua acessibilidade e pode apresentar riscos de segurança para espeleólogos, turistas, etc. Por outro lado, uma má qualidade da iluminação utilizada, seja pela falta de um número adequado de fontes de iluminação em si, ou pela má disposição/distribuição dessas fontes durante a captura dos

dados, pode interferir no posterior processamento das informações devido às superfícies reflexivas e à criação de sombras dentro da caverna.

Porém, na literatura científica não há um consenso sobre a melhor técnica de iluminação artificial para captura de dados 3D em ambientes espeleológicos, e portanto existem diversas abordagens adotadas com esse propósito.

Alguns autores adotam fontes de iluminação artificiais acopladas aos equipamentos de proteção individual (especificamente, aos capacetes de segurança). Giordan et al. (2021), no paper sobre comparação das técnicas LiDAR e SfM (Structure from Motion) para representação 3D de cavernas, utilizam essa abordagem para iluminação do ambiente. Os autores sinalizam a importância de contar com uma iluminação difusa que permita uma adequada renderização da caverna durante a etapa de pós-processamento. Eles sugerem que, quando possível, os operadores responsáveis pelo levantamento dos dados iluminem em direções opostas entre eles e de forma indireta na câmera, para evitar efeitos de cegueira no sensor. A necessidade de uma iluminação indireta e uniforme a partir de fontes de luz bem distribuídas é também trazida por Iturbe et al. (2018), no trabalho sobre digitalização de cavernas que albergam arte paleolítica.

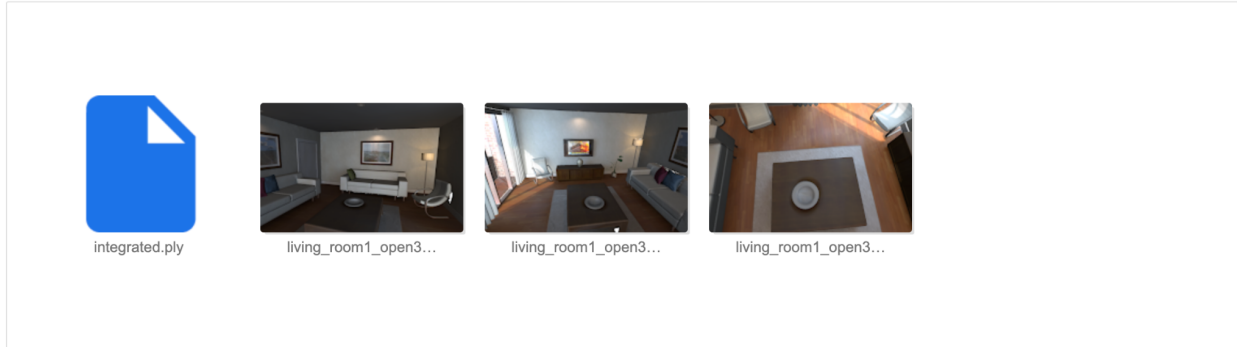
Já outros autores utilizam lâmpadas led externas montadas junto com os sensores de captura, como Hoffmeister et al. (2016), que utilizam uma lâmpada "NPE light CN-240CH" disposta junto com a câmera digital, que por sua vez é colocada acima do laser scanner utilizado para conseguir uma boa iluminação do espaço. No citado trabalho, os autores indicam que foi preciso fazer um trabalho manual para melhorar o contraste e a iluminação de algumas fotos usadas para a texturização, utilizando softwares específicos de edição de fotografias. Fisher et al. (2015), no paper sobre criação de perfis estratigráficos a partir de fotomosaicos, adotam duas luzes de flash ("Nikon speedlights") para iluminação artificial, usadas junto com um difusor de luz ("flash diffusion paper"). No trabalho, tanto a câmera quanto as luzes foram montadas em um mastro ajustável. Porém, o acoplamento de vários instrumentos juntos pode ser desvantajoso em questões de portabilidade (Weidner et al. 2017).

O trabalho de Zhang et al. (2018) apresenta os avanços no desenvolvimento de uma solução de reconstrução 3D de cavernas utilizando uma câmera RGB-D, iluminação led e um drone, para realizar o levantamento de dados tridimensionais em cavernas. No trabalho, é relatado o problema de ter uma iluminação em movimento, que pode trazer consequências negativas no processamento dos dados com certas soluções de reconstrução.

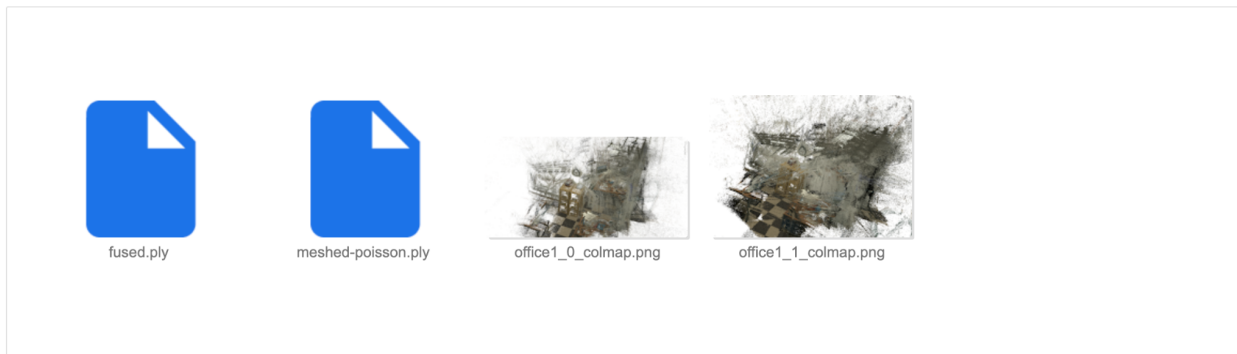
Como fica em evidência, são vários os desafios associados com a falta de iluminação natural em ambientes de cavernas, principalmente para modelagem tridimensional. Não somente a ausência de luz, mas também a não constância da mesma e a sua distribuição não homogênea podem interferir nos resultados alcançados. O planejamento prévio e o entendimento das vantagens e desvantagens das diferentes formas de iluminação artificial que podem ser utilizadas é fundamental para um levantamento da informação colorida bem sucedido.

Soluções de Reconstrução 3D

OPEN 3D



COLMAP



Resultados

Processo de Reconstrução 3D

O processo de reconstrução proposto é dividido por cada técnica de reconstrução de baixo custo que foi estudada e está dividido de acordo com a figura a seguir.

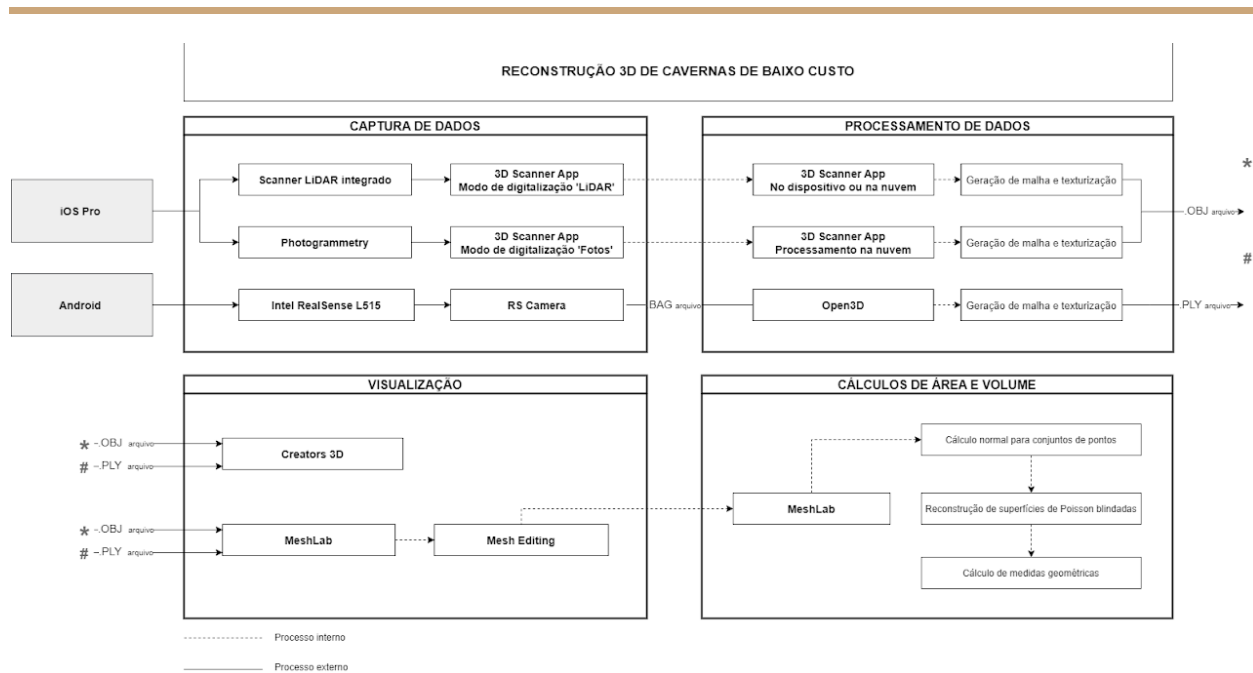


Figura 1. Processo de Reconstrução 3D proposto.

3D APP - Modo Fotos

Selecionar um canto inicial para a varredura é sugerido para reconstruções fotogramétricas. O sistema de iluminação escolhido deve ser idealmente difuso, e atenção especial deve ser dada para não criar sombras. Duas alternativas podem ser seguidas para capturar fotografias usando o 3D: Pode-se capturar imagens automaticamente pelo modo Auto Capture a cada 0,9 seg (este temporizador possa ser aumentado), ou pelo modo de Captura Manual, que leva fotos somente quando o usuário pressiona o botão do obturador. O primeiro é recomendado para reconstruções de pequeno porte, enquanto o último é uma opção melhor para ambientes médios e grandes. Independentemente do modo de captura escolhido, fotos adjacentes devem ter 70% ou mais de sobreposição. Além disso, no máximo 250 fotos devem ser capturadas. Caso sejam necessários mais disparos para concluir a digitalização de todo o ambiente, é aconselhável fazer várias varreduras pequenas.

Após a conclusão da digitalização, os dados são processados no aplicativo 3D Scanner. As fotografias serão inicialmente carregadas. Nesse estágio, o aplicativo não pode ser fechado até que o processo seja concluído. Depois disso, o processamento de dados é iniciado. Esta tarefa pode levar alguns minutos para terminar. Quando o processamento é concluído, a reconstrução final pode ser visualizada dentro do aplicativo.

O produto final deve então ser salvo no formato .OBJ (compartilhamento de links da web e outros formatos de arquivo também estão disponíveis). Para estimar área e volume, o arquivo .OBJ deve ser importado para MeshLab. Antes das medições geométricas, o usuário deve

calcular a normal dos vértices usando o recurso "Compute Normals para Point Sets", de modo que o algoritmo "Screened Poisson Surface Reconstruction" pode ser usado posteriormente para criar uma malha fechada. Todos os corpos fora de contexto desconectados da malha principal devem ser excluídos antes dos cálculos de volume. Dessa forma, é possível estimar área e volume usando o recurso "Calcular medidas geométricas". Se nenhuma medição precisar ser estimada a partir do modelo, o arquivo .OBJ pode ser diretamente visualizado usando o Creators 3D. Caso o arquivo esteja compactado, não é necessário descompactá-lo para importar para a ferramenta online. Alguns recursos como o Wireframe e as configurações do "Light Probe" podem ser ajustadas para uma melhor experiência de visualização. O modelo pode ser carregado e compartilhado usando um link da web.

O processo em detalhes pode ser visualizado na figura a seguir.

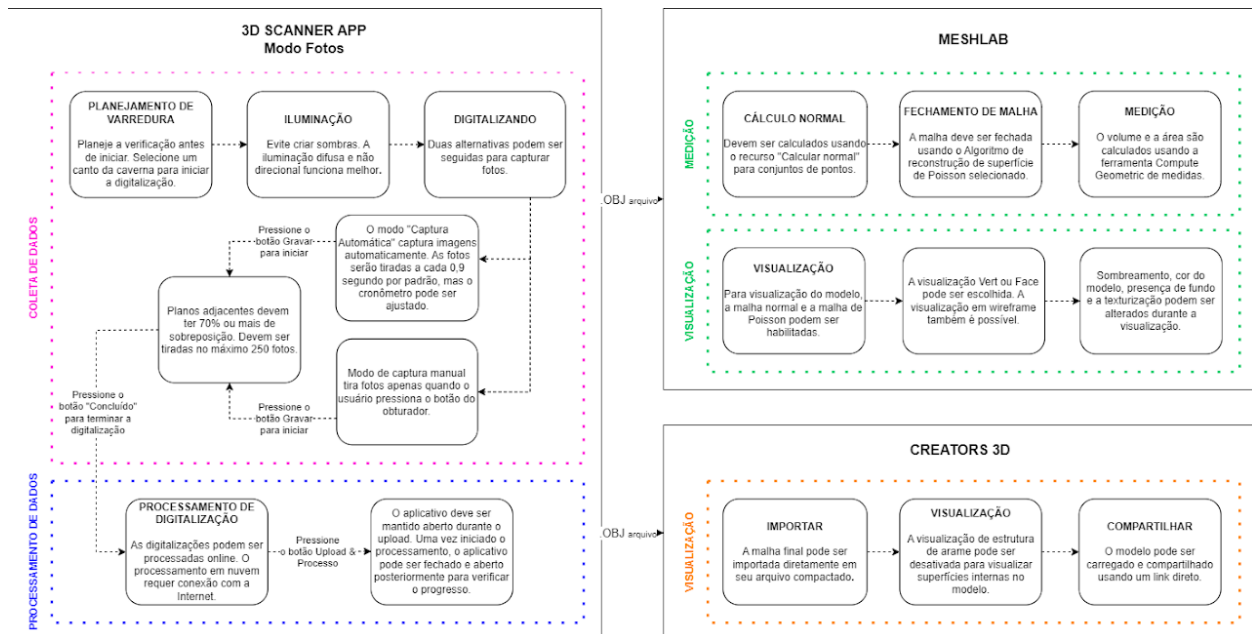


Figura 2. Processo de reconstrução 3D usando o modo "fotos" do 3DScanner App.

3D APP - Modo Lidar

O primeiro passo na reconstrução 3D é a coleta de dados. O iPhone 13 Pro Max e o aplicativo 3D Scanner foram usados para esse fim. Planejar a verificação antes de iniciar a captura de dados é fundamental para não capturar várias vezes as mesmas áreas. Antes de digitalizar, também é importante definir criteriosamente o sistema de iluminação a ser utilizado. Como, por exemplo, luzes difusas e não direcionais funcionam melhor ao texturizar a reconstrução. A digitalização é iniciada na tela principal do aplicativo 3D Scanner. O sensor deve ser movido em

um padrão lento, em zigue-zague, para cima e para baixo durante a digitalização. Adicionalmente, deve-se adotar uma distância de 2-3 m da parede e de outros objetos, se possível.

O 3D Scanner App mostra um preenchimento de textura de grade nas áreas que já foram capturadas, ajudando a prevenir a digitalização duplicada das mesmas superfícies. Também deve-se ter cuidado na possível presença de objetos altamente reflexivos dentro da caverna, pois escaneá-los deve ser evitado, já que o algoritmo pode apresentar erros de reconstrução e as informações coletadas anteriormente na mesma varredura podem ser danificadas.

Depois de concluir a etapa de digitalização, os dados também são processados no aplicativo 3D Scanner. A opção indicada para essa etapa é a de processamento HD. Nesta etapa, a estimativa de tempo de processamento é exibida. O aplicativo não deve ser fechado durante esse período e quando o processamento é concluído, a reconstrução final pode ser visualizada dentro do aplicativo. O produto final deve então ser salvo no formato .OBJ (compartilhamento de links da web e outros arquivos formatos também estão disponíveis). Para estimar área e volume, o arquivo .OBJ é então importado para MeshLab. Antes das medições geométricas, o usuário deve calcular a normal dos vértices usando o recurso "Compute Normals for Point Sets", de modo que o algoritmo "Screened Poisson Surface Reconstruction" pode ser usado posteriormente para criar uma malha fechada.

Todos os corpos fora de contexto desconectados da malha principal devem ser excluídos antes dos cálculos de volume. Dessa forma, é possível estimar área e volume usando o recurso "Calcular medidas geométricas". Se nenhuma medição precisar ser estimada a partir do modelo, o arquivo .OBJ pode ser diretamente visualizado usando o Creators 3D. Caso o arquivo esteja compactado, não é necessário descompactá-lo para importar para a ferramenta online. Alguns recursos como o Wireframe e as configurações do Light Probe podem ser ajustados para uma melhor experiência de visualização. O modelo pode ser carregado e compartilhado usando um link da web.

O processo em detalhes pode ser visualizado na figura a seguir.

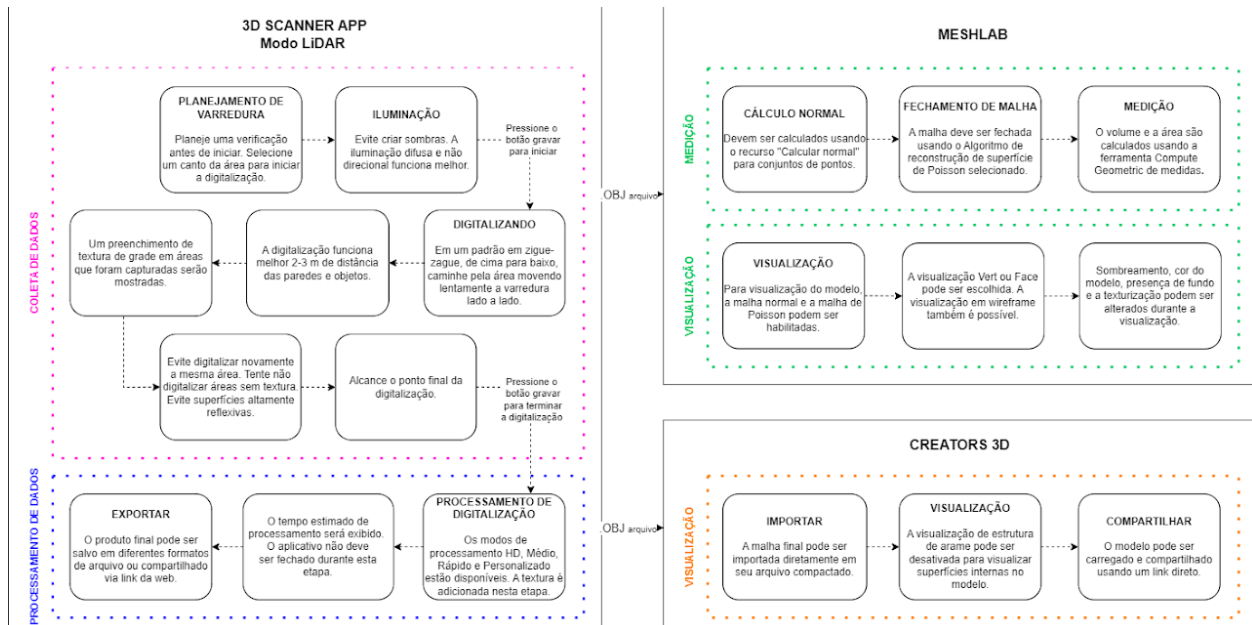


Figura 3. Processo de reconstrução 3D usando o modo "Lidar" do 3DScanner App.

3D com Intel RealSense L515

Diferentemente dos métodos descritos anteriormente, para usar o Intel RealSense L515, a câmera tem que ser acoplada a um Smartphone Android via USB com conexão tipo-C. Os dados são coletados por meio do aplicativo RS Camera e antes de iniciar o escaneamento, as configurações 'No Ambient Light' e 'Low Ambient Light' devem ser ativadas. Para definir quais ferramentas de iluminação devem ser usadas, deve-se considerar a luz de halogêneo e alguns LED. As fontes de luzes podem reduzir o desempenho do L515. Muita luz no ambiente pode resultar em um mapa de profundidade com muitos furos. E, pelo contrário, superfícies muito escuras podem reduzir a faixa de profundidade. Ao escanear o ambiente, caminhar em um ritmo médio é o ideal, pois capturas muito rápidas e muito lentas podem prejudicar a captura de dados. Medição de profundidade funciona melhor em superfícies ásperas com reflexão difusa: superfícies altamente reflexivas podem fazer com que a luz do laser não seja refletida de volta para o receptor. Além disso, deve-se considerar que durante as atividades dentro da caverna, deve ser evitado colocar a câmera em um case de proteção sem fluxo de ar, pois a câmera só suporta operações até 30°C.

Quando a digitalização é concluída, um arquivo de extensão .BAG é salvo no Smartphone. Este é o arquivo usado para processamento de dados. Antes de executar o Open3D e gerar a malha 3D, um ambiente Python precisa ser instalado/lançado no PC do usuário. O kit de ferramentas de desenvolvimento NVIDIA CUDA foi usado no presente estudo para otimizar o processo usando GPU. A etapa de processamento consiste em executar as linhas de código disponíveis no GitHub e descritas no RealSense com o tutorial do Open3D. Depois de concluído, o produto final fica disponível no formato .PLY para serem exportados para visualização e medição. Para estimar área e volume, o arquivo .OBJ é então importado para MeshLab. Antes das medições geométricas, o usuário deve calcular a normal dos vértices usando o recurso "Compute Normals for Point Sets", de modo que o algoritmo "Screened Poisson Surface Reconstruction" pode ser usado posteriormente para criar uma malha fechada. Todos os corpos fora de contexto desconectados da malha principal devem ser excluídos antes dos cálculos de volume. Dessa forma, é possível estimar área e volume usando o recurso "Calcular medidas geométricas".

Se nenhuma medição precisar ser estimada a partir do modelo, o arquivo .OBJ pode ser diretamente visualizado usando o Creators 3D. Caso o arquivo esteja compactado, não é necessário descompactá-lo para importar para a ferramenta online. Alguns recursos como o Wireframe e as configurações do Light Probe podem ser ajustados para uma melhor experiência de visualização. O modelo pode ser carregado e compartilhado usando um link da web.

O processo em detalhes pode ser visualizado na figura a seguir.

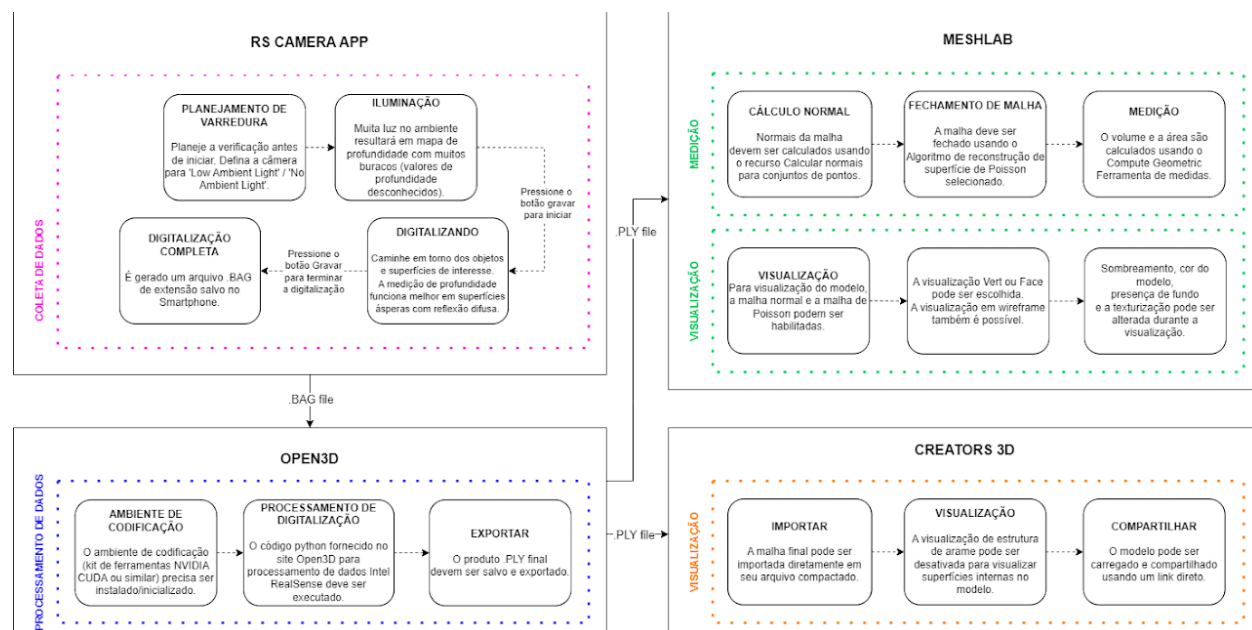


Figura 4. Processo de reconstrução 3D usando a câmera da Realsense L515.

Dissertação de Mestrado

Este projeto de pesquisa gerou o trabalho de mestrado intitulado de "3D Reconstruction of Caves: An analysis of existing low-cost reconstruction alternatives and their application process", apresentado pela aluna Maria Gimena Chaves Fitzgerald, com orientação da Profa. Veronica Teichrieb e coorientação do Prof. João Marcelo Xavier Natário Teixeira (UFPE/DES). Foi apresentado no dia 26/04/2023, pelo Centro de Informática da UFPE.

A banca examinadora foi composta pelos professores: Prof. Adiel Teixeira de Almeida Filho (UFPE / Centro de Informática), Prof. Enrico Bernard (UFPE / Departamento de Zoologia) e Profa. Veronica Teichrieb (UFPE / Centro de Informática).

Artigos Publicados

Dois artigos foram publicados ao longo do projeto:

Low Cost 3D Reconstruction of Caves (VISAPP 2023)

Este artigo apresentou uma proposta de solução de baixo custo que combina hardware e software para permitir a captura de informações espaciais da caverna por meio de sensores RGB-D e a interpretação posterior dos dados processados. Essa solução permite a navegação em uma caverna reconstruída em 3D, e pode ser usada para estimar informações de volume e área, frequentemente necessárias para conservação ou licenciamento. A solução foi validada reconstruindo parcialmente uma caverna no Nordeste do Brasil. Embora alguns desafios tenham que ser superados, a abordagem mostrou que foi possível resgatar informações apesar de usar sensores RGB-D de baixo custo.

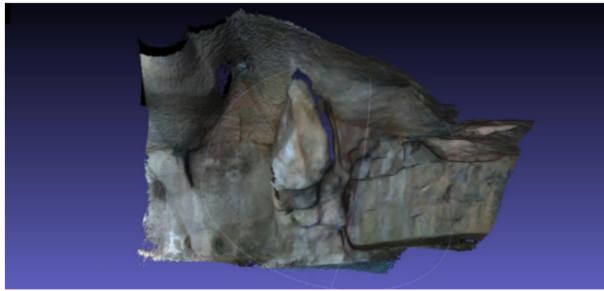
RECONSTRUÇÃO 3D DE BAIXO CUSTO APLICADA A AMBIENTES DE CAVERNAS (CBGE 2022)

Este artigo apresentou 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.

Capturas 3D

Ao longo do projeto, foram realizadas reconstruções 3D em 3 locais distintos, ilustrados nas três figuras a seguir.

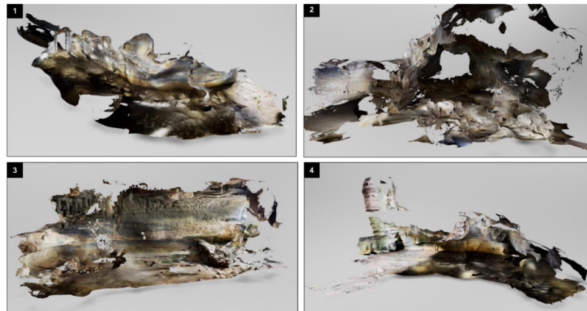
Gruta Lourdes Grotto



| TITLE | LAST MODIFIED |
|----------------------|---------------------------------------|
| Reconstruction_1.zip | May 30 Maria Gimena Chaves Fitzgerald |
| Reconstruction_2.zip | May 30 Maria Gimena Chaves Fitzgerald |

Figura 5. Amostra dos arquivos gerados a partir da reconstrução realizada.

Gruta da Macumba



| TITLE | LAST MODIFIED |
|--|---------------------------------------|
| Corredor_entrada_-_Gruta_da_Macumba_08_35_29.zip | Mar 20 Maria Gimena Chaves Fitzgerald |
| Corredor_entrada_2_-_Gruta_da_Macumba_08_49_49.zip | Mar 20 Maria Gimena Chaves Fitzgerald |
| Entrada_Gruta_Macumba_-_exterior_08_34_20.zip | Mar 20 Maria Gimena Chaves Fitzgerald |
| Sala_principal_-_Gruta_da_Macumba_08_44_09.zip | Mar 20 Maria Gimena Chaves Fitzgerald |
| Segunda_sala_saida_-_Gruta_da_Macumba_08_46_06.zip | |

Figura 6. Amostra dos arquivos gerados a partir da reconstrução realizada.

Gruta da Lapinha

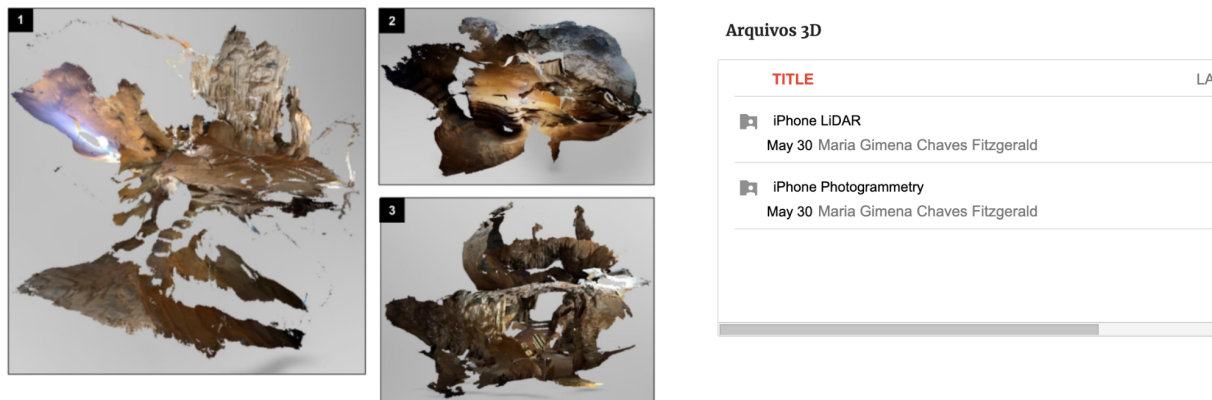


Figura 7. Amostra dos arquivos gerados a partir da reconstrução realizada.

Conclusão

Devido a inúmeras dificuldades ao longo do projeto, destacando-se o nível de dificuldade do mesmo e a frequente mudança de integrantes da equipe, não foi possível atingir o objetivo original do projeto, que era o de desenvolver uma plataforma de baixo custo que pudesse realizar o processo de captura e reconstrução 3D das cavernas. Em contrapartida, o projeto gerou, como resultado de uma dissertação de mestrado, um processo que permite instanciar um pipeline de reconstrução 3D independente dos dispositivos utilizados. Três possíveis caminhos do pipeline foram validados e reconstruções foram realizadas. Todas as informações produzidas durante o projeto estão disponíveis no site do mesmo, cujo endereço encontra-se disponível no início deste documento.