

FOTOGRAMETRIA SUBAQUÁTICA APLICADA À RECONSTRUÇÃO 3D DE OBJETO SUBMERSO

Danilo Henrique Santos Silva (Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação – UFPE) E-mail: dhsantossilva@gmail.com

Leonardo Carlos Barbosa (Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação – UFPE) E-mail: leonardocarlos21@gmail.com

Luiz Filipe Campos do Canto (Programa de Pós-graduação em Ciências Cartográficas - UNESP) E-mail: luiz.canto@unesp.br

Maxsuel Bomfim Luz Lopes (Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação – UFPE) E-mail: maxbomfim88@gmail.com

Carlos Alberto Borba Schuler (Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação – UFPE) E-mail: cschuler@ufpe.br

Resumo: Com os atuais avanços tecnológicos dos softwares de modelagem tridimensional e câmeras que podem fotografar debaixo d'água, o uso da fotogrametria ficou mais acessível para aquisição de informações em ambiente aquático. A fotogrametria subaquática segue os princípios básicos da fotogrametria terrestre e aérea, na criação de modelos 3D através do uso de fotografias 2D, com uma diversidade de áreas que podem ser concedidas devido o uso das técnicas. Contudo, a água contém particularidades diferentes do ar, principalmente em relação a propagação da luz no meio e partículas suspensas que afetam a visibilidade, sendo necessárias pesquisas para melhoria e maior compreensão. Neste artigo é apresentado uma metodologia para reconstrução de objetos submersos em uma piscina, com o uso da Câmera digital GoPRO, auxílio de levantamentos GNSS e topográfico para georreferenciar os pontos de apoio submersos e o software ContextCapture para a modelagem 3D. O resultado do modelo tridimensional dos objetos imageados apresentaram resultados esperados para uma análise fotogramétrica, sendo possível dimensionar e avaliar a qualidade do objeto processado.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto, Modelagem 3D, Fotogrametria Subaquática

UNDERWATER PHOTOGRAMMETRY APPLIED TO 3D RECONSTRUCTION OF SUBMERGED OBJECTS

Abstract: With the current technological advances of three-dimensional modeling software and cameras that can photograph underwater, the use of photogrammetry has become more accessible for acquiring information in an aquatic environment. Underwater photogrammetry follows the basic principles of terrestrial and aerial photogrammetry, in the creation of 3D models through the use of 2D photographs, with a diversity of areas that can be granted due to the use of the techniques. However, water contains different particularities from air, mainly in relation to the propagation of light in the medium and suspended particles that affect visibility, being necessary research for improvement and greater understanding. This article presents a methodology for the reconstruction of submerged objects in a swimming pool, using the GoPRO digital camera, the aid of GNSS and topographic surveys to georeference the submerged support points and the ContextCapture software for 3D modeling. The result of the three-dimensional model of the imaged objects presented expected results for a photogrammetric analysis, being possible to dimension and evaluate the quality of the processed object.

Keywords: Remote Sensing, 3D Modeling, Underwater Photogrammetry

1. Introdução

A tecnologia da modelagem tridimensional da realidade tem sido largamente utilizada na atualidade. A fotogrametria é uma das tecnologias que permitem a reconstrução 3D. O princípio do desenvolvimento da fotogrametria foi utilizada para finalidades terrestres, onde segundo (Figueira et al., 2015), seu principal objetivo é reconstruir tridimensionalmente um objeto ou cena a partir de um grande número de fotografias

tiradas de diferentes pontos de vista. Posteriormente, foi introduzida para uso subaquático.

A fotogrametria subaquática fornece uma gama de informações armazenadas nos bits de um registro fotográfico obtidos por câmeras fotográficas. Em 1968, o escritório Naval de Oceanografia dos Estados Unidos apresentava algumas aplicações referente à fotogrametria subaquática, utilizando especificamente 5 elementos: pontos de controle, equipamentos fotográficos, técnicas de campo, análises fotográficas e resultados (REBIKOFF, 1968).

Assim como na fotogrametria terrestre, na aerofotogrametria e fotogrametria subaquática enfrentou algumas dificuldades no início, porém, com o avanço da tecnologia e a acessibilidade às câmeras fotográficas para esta finalidade, tornaram-se mais frequentes os estudos relacionados com o tema, sendo cada vez mais utilizada para estudar e monitorar esse tipo de ambiente. Na época atual alguns trabalhos estão sendo desenvolvidos utilizando recursos das técnicas de registro fotográfico abaixo d'água, variando na obtenção de produtos bidimensionais e tridimensionais (GUO et al., 2016; DIAMANTI et al., 2017; DRAP et al., 2017; DRAP, 2015).

O ambiente subaquático é uma região com diversas adversidades, principalmente devido à falta de informações GNSS para auxiliar no posicionamento das fotografias, a refração da luz que reduz o campo de visão, variações da iluminação e claridade da água que afetam a qualidade da imagem e, conseqüentemente, o cálculo da posição e orientação das fotografias (WOLF, DEWITT E WILKINSON (2014); GUO et al., 2016; ROSCIAN et al., 2021). Com base nesses fatores, técnicas e tecnologias foram desenvolvidas na área de hardware e softwares na captura de imagens, visão computacional e processamento de imagens para a modelagem tridimensional de alta resolução.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia para reconstrução de objetos submersos utilizando posicionamento GNSS e levantamento topográfico para georreferenciar pontos de controle submersos e o software ContextCapture para a reconstrução 3D. O controle da qualidade foi feito implantando-se pontos de controle no fundo da piscina utilizando técnicas topográficas. Estes pontos foram importantes para a reconstrução 3D do objeto submerso.

2. Principais características da fotogrametria subaquática

A fotogrametria subaquática adquiridas desde mergulhadores a Autonomous Underwater Vehicles (AUV), onde podem navegar pela água por conta própria em um caminho pré-programado, tem sido empregado em diversas aplicações, principalmente no ramo naval (YAMAFUNE, TORRES e CASTRO, 2017; BELTRAME e COSTA, 2018; GUTIÉRREZ-ROMERO et. al, 2022), da oceanografia (MARRE et. al, 2019; ABADIE, BOISSERY e VIALA, 2018; URBINA-BARRETO et. al, 2022), da arqueologia (COSTA, 2022; MCALLISTER, 2021; CALANTROPIO, CHIABRANDO e AURIEMMA, 2021), da biologia (ROSCIAN et. al, 2021; OLINGER et. al, 2019; RENDE et. al, 2022) e do setor petrolífero (SALAZAR, 2020; CHEMISKY et. al, 2021; RUMSON, 2021), tendo como exemplo, o uso para inspeções de tubulações, desenvolvimento de projetos nas plataformas de produção de petróleo, mensurar taxa de crescimento de organismos, estruturas de navios, escavações arqueológicas submarinas e deposição de sedimentos no fundo do mar.

A fotogrametria subaquática em comparação com as tradicionais (terrestre e aérea),

enfrenta alguns problemas que interfere no uso aquático. Na tomada de uma foto debaixo d'água, deve-se se precaver de possíveis acidentes com a câmera, pois ela está sujeita a curto-circuito ou explosões. Diante destes problemas, é necessário câmeras à prova d'água e em locais de grande profundidade é necessário acoplar a câmera dentro de uma caixa subaquática com boa espessura para suportar a pressão dentro da água. Contudo, quando a luz entra na câmera é refratada duas vezes (primeiro na interface água-vidro e depois na interface vidro-ar). Isto significa que os raios refratados não são paralelos pois seguem direções opostas que influenciam na geometria da visão, assim como problemas de absorção e espalhamento também afetam a fotografia, pois antes dos raios luminosos entrarem na caixa de vidro, eles se colidem com as moléculas de água, o que acaba alterando a cor dos registros fotografados, levando à tonalidade verde ou azul, típica de contrastes de imagens subaquáticas (JORDT, 2014; DAMME, 2015).

Para melhor conhecimento, há a necessidade de compreender a respeito da refração e absorção da luz em imagens subaquáticas. De acordo Halliday, Resnick e Walker (2016), a refração da luz se dá quando os raios de luz passam de um meio para outro (do ar para a água), onde se dobras, denomina-se refração. A Lei de Snell, ou 2ª Lei da Refração (NUSSENZVEIG, 2014), pode ser calculada utilizando-se equação 1. Este efeito causa distorção na perspectiva, tornando-se um dos grandes problemas para a fotogrametria subaquática, pois em muitos casos não é possível compensar esta distorção durante o processamento da imagem.

$$n_1 \sen i = n_2 \sen r \quad (1)$$

Onde: i e r são, respectivamente, os ângulos de incidência e refração; v_1 e v_2 são as velocidades nos meios escolhidos e n_1 e n_2 são os índices de refração dos meios escolhidos.

A figura 1 ilustra exemplos de refração da luz através de um diagrama. O raio incidente (R) ao passar na normal (N) pelo ponto de incidência I é refletido pela água e refratado (R') para baixo d'água e um experimento feito com um lápis dentro de um copo de água, conhecido como "lápis quebrado" apresenta claramente o efeito de distorção, dando a impressão de o lápis estar realmente quebrado.

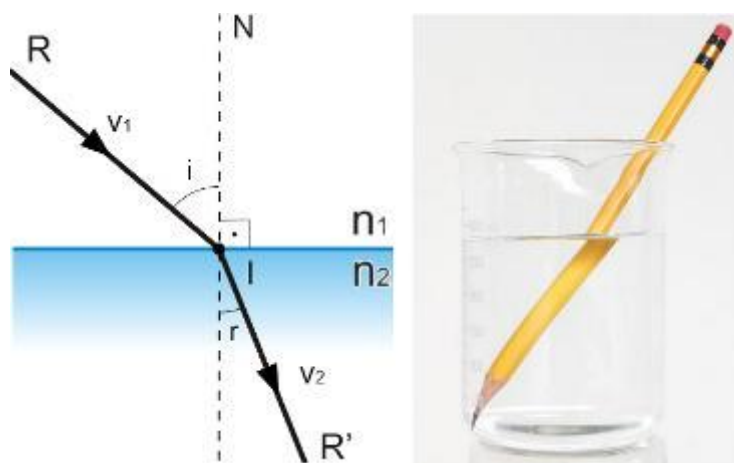


Figura 1 –Ilustração e experimento destacando a refração da luz

A refração também apresenta um índice (n) que é calculado através da velocidade da fase (v) e da velocidade da luz (c). O índice de refração é expresso pela equação 2.

$$n = c/v \quad (2)$$

Pesquisas vêm utilizando uma técnica conhecida como SfM (Structure from Motion) para a construção de modelos tridimensionais, inclusive subaquáticos. Esta técnica consiste no processamento de um vídeo ou uma série de fotografias bidimensionais (RAOULT et al., 2016). O SfM primeiro exige que as fotos sejam alinhadas (RAOULT et al., 2016), devendo-se levar em consideração as equações de colinearidade (OTERO et al., 2017), verificando que são similares às utilizadas em fotogrametria terrestre, aplicando-se, sobretudo, a correção da refração. Para maiores informações da modelagem matemática, consultar Ya-Bing et al. (2011).

Em relação a absorção da luz, medida que a luz viaja através da água, ela é gradualmente absorvida devido às interações entre a radiação da luz e as moléculas de água. Entretanto, esta absorção é seletiva e ocorre de forma diferente em várias frequências dentro do espectro. Esse efeito prejudica bastante a fotogrametria, pois à medida que um alvo é registrado, dependendo da distância que for tomada da imagem, o feixe de luz irá percorrer certa distância e retornará sem um dos comprimentos de onda, ou seja, se tratando do visível, o vermelho seria absorvido primeiro por ter uma onda maior dentro a faixa do visível. Logo, para se obter uma melhor qualidade e evitar este efeito de absorção, é necessário fazer o registro fotográfico com distância curta entre os alvos.

A figura 2 ilustra o efeito de absorção, aonde descreve que quanto maior for o comprimento de onda dentro da faixa do visível, a absorção será mais rápida que os de onda curta.

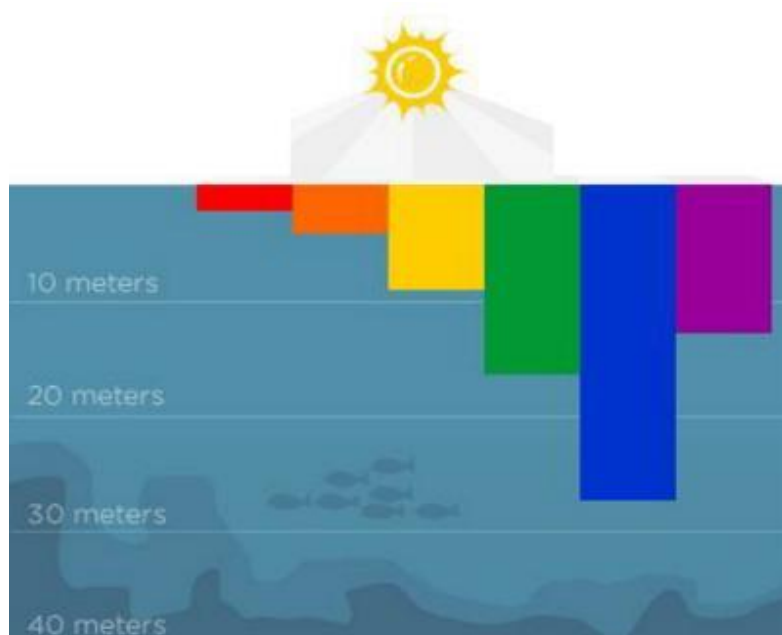


Figura 2 – Ilustração da absorção da luz na água

Fonte: Adaptado de Damme, 2015

Além da refração e propagação da luz abaixo d'água, a natureza e propriedades físico-químicas componentes da água proporcionam processos de absorção e espalhamento da radiação, resultando em diferentes respostas espectrais. A figura 3 apresenta três tipos de efeitos de cor em ambientes distintos



Figura 3 – Ilustração de diferentes tipos de efeito de cor em ambientes aquáticos diferentes

Fonte: Adaptado de Jordt, (2014)

De acordo com de Jordt (2014), a absorção do espectro eletromagnético depende do tipo de partícula, do comprimento de onda eletromagnética e da concentração das partículas no corpo da água. Os espectros de absorção de moléculas diferentes se sobrepõem na parte do infravermelho, absorvendo mais de 50% deste comprimento de onda em apenas alguns centímetros dentro da água. Além disso, também ocorre o fenômeno de espalhamento, onde um fóton que é colidido com uma molécula é absorvido e outro fóton é imediatamente liberado. Assim como na absorção, o espalhamento pode ser mesclado com outras partículas, seja da água ou de outro corpo no ambiente aquático.

De acordo com Temba (2000) e Wolf, Dewitt e Wilkinson (2014), para os produtos fotográficos quando se diz respeito à métrica, que são trabalhos mais voltados à fotogrametria, se faz necessário os parâmetros para a realização da orientação interior (recuperação da posição da imagem em relação à câmera), relativa (reconstrução da posição da imagem em relação a outra) e exterior (recuperação da posição e atitude conforme um referencial terrestre).

3. Métodos e Procedimentos da Pesquisa

Visando uma aplicação de baixo custo para reprodução 3D de objetos submersos, foi realizado um levantamento subaquático em uma piscina (Figura 4 (a)) com o objetivo de desenvolver uma metodologia de levantamento prático e avalia-lo conforme os resultados obtidos. Os objetos imageados escolhidos (Figura 4 (b)) foram placas de pedra e vasos de cimento, por causa da estabilidade que o peso dos materiais proporciona embaixo d'água.



Figura 4 – Área de estudo. (a) Piscina. (b) Objetos imageados

A figura 5 ilustra o processo metodológico para aquisição e tratamento dos dados.

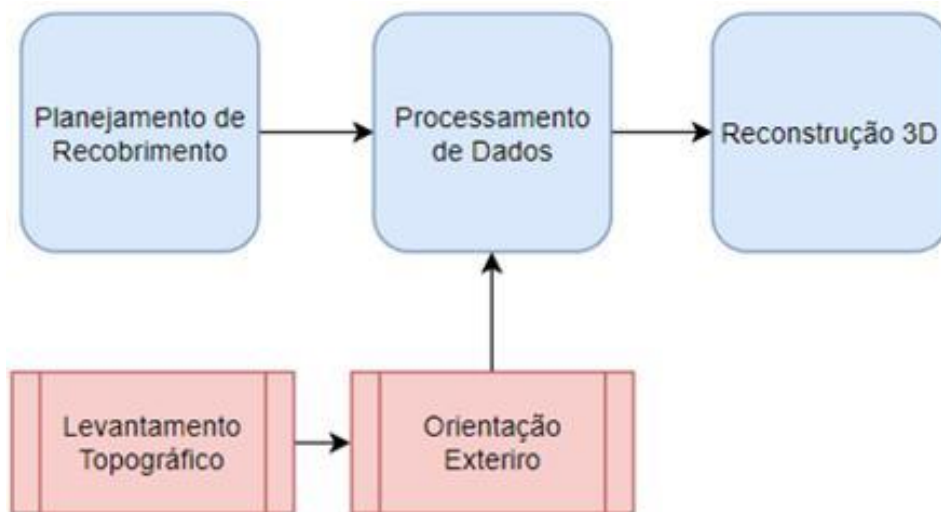


Figura 5 – Processo Metodológico

A etapa do planejamento e recobrimento do objeto a ser fotografado é de extrema importância, pois, nesta fase é definida a escala e a quantidade de faixas necessárias para realizar o recobrimento lateral e longitudinal para obtenção da zona de estereoscopia e geração do modelo em três dimensões.

Por ser uma projeção central e não normal como a cartografia, a fotografia não tem uma escala uniforme em toda a sua área. Pode-se dizer que a escala é pontual conforme a distância vertical a que está cada ponto objeto do centro de projeção. No entanto é possível definir uma escala média (E_m) a partir de uma distância entre o terreno médio e o referido centro de projeção, ou seja, a altura média (H_m) acima do terreno (equação 3).

$$E_m = c/H_m \quad (3)$$

Para fazer o plano de sobreposições na piscina foi necessário considerar a profundidade média igual à profundidade da piscina. Isso porque a tomada de fotografias foi feita por operador conduzido externamente por tração. Foram utilizados os seguintes acessórios para a tomada das fotografias:

- Câmera digital GoPRO Hero5 Black;
- Corda guia para o operador;
- Trena para controle das faixas de sobreposição;
- Boia para estabilidade do operador na água.

No total, foram definidas 6 faixas de fotografias verticais, divididas em 3 faixas longitudinais e 3 faixas laterais com o recobrimento respectivamente entre elas de 60% e 30%. A figura 6 ilustra o esquema para obtenção das faixas, representadas por retângulos vermelhos, recobrimo o objeto, destacado em cinza, sobre a ilustração da piscina, em azul. Para geração do objeto por completo em 3D, foram também realizadas fotografias submersas horizontais em torno do objeto, respeitando os recobrimentos mínimos entre as fotografias.

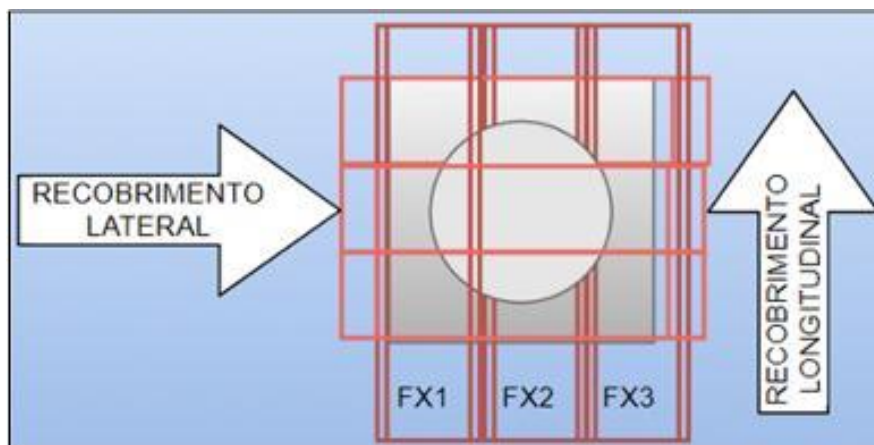


Figura 6 – Faixas e recobrimentos laterais e longitudinais

Para realização da orientação exterior foi necessário obter pontos de apoio. Esta etapa serviu para definição de um sistema de coordenadas, referenciado ao Sistema Geodésico de Referência SIRGAS2000 e correção do relevo e escala. No entanto, ao invés do uso da altitude geométrica; nas medições com estação total foi definida uma superfície de nível fictícia no ponto A, por meio de uma cota, onde os pontos cuja posição é conhecida por suas coordenadas (x, y) acrescida o valor da posição espacial (h). A referência de nível foi estabelecida como a cota de referência e arbitrado o valor de 100,000 m. Com base nesta referência, foi definida a cota dos demais vértices irradiados. A realização dos levantamentos GNSS e topográficos foram realizados com o uso dos seguintes equipamentos:

- Receptores GNSS Hiper Lite V de dupla frequência (L1/L2) com precisão horizontal de 3mm + 0,5 ppm e vertical de 5mm + 0,5 ppm para levantamentos estáticos;
- Estação Total North precisão 5”;
- Bastão com Prisma: usado para prolongamento da visão dos alvos para o operador da estação;
- Trena de fibra: usada para aquisição das alturas dos instrumentos;
- Mira graduada;
- Piquetes: usados para marcação dos pontos de apoio terrestres;
- Adaptadores Base-Prisma: usados para centragem forçada dos pontos de apoio.

O reconhecimento na área entorno da piscina foi realizado para definir a configuração geométrica do levantamento. Baseado nisso, foi estabelecido a materialização de quatro pontos de referência (P1, P2, A e B) e alvos refletivos (1 a 7) fixados com adesivo epóxi de alta aderência nas placas de pedra (figura 7). Os pontos de referência P1 e P2 foram obtidos através do levantamento GNSS por intermédio do método de posicionamento estático. O processamento e ajustamento das coordenadas foi obtida com a utilização da estação de referência da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) RECF (Recife) e uso de efemérides precisas.

Os pontos A e B foram georreferenciados através de poligonização 3D com estação total e os alvos refletivos por irradiação tridimensional com o auxílio do bastão com mira. As coordenadas finais foram ajustadas através do Método dos Mínimos Quadrados

(MMQ). Conforme a figura 7, miras graduadas foram usadas no fundo da piscina, ao lado das placas de pedra, para facilitar aplicação de escala no pós-processamento.



Figura 7 – Localização dos alvos refletivos e miras graduadas dos objetos de estudo

A figura 8 mostra o resultado dos levantamentos GNSS e topográfico com a plotagem dos pontos levantados e a tabela 1 as coordenadas (E, N, h) calculadas para cada alvo submerso, com destaque para as coordenadas ajustadas dos 7 pontos de apoio, utilizados para orientação exterior.

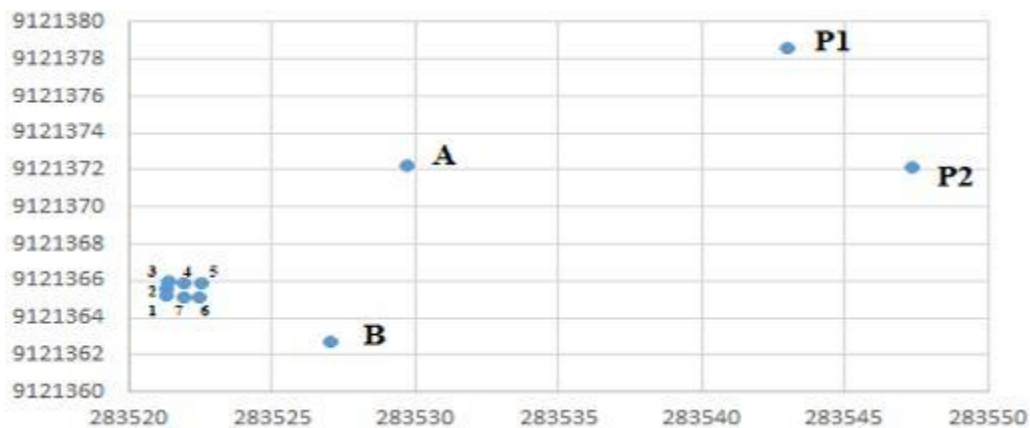


Figura 8 – Resultados dos levantamentos GNSS e topográfico

Tabela 1 – Coordenadas ajustadas (E, N, h).

Ponto	E	N	h
1	283521,30580	9121365,22645	96,99235
2	283521,33626	9121365,58724	96,99544
3	283521,35908	9121365,93492	96,99901
4	283521,89551	9121365,90494	97,00240
5	283522,50230	9121365,83754	97,00574
6	283522,45424	9121365,09245	97,00127
7	283521,89403	9121365,14252	96,99821

Para o processamento dos dados, foi utilizado o software ContextCapture, que permite produzir rapidamente modelos 3D mais complexos de condições existentes para projetos de infraestrutura de todos os tipos, a partir de fotografias simples. Após a

inserção das fotografias no programa, foi realizada a orientação exterior com os pontos de apoio e, posteriormente, a aerotriangulação (determinação das coordenadas dos pontos escolhidos sobre um conjunto de fotografias superpostas acima dos pontos).

A tabela 2 apresenta os resultados da orientação exterior. Devido aos problemas de refração e turbidez da água, não foi possível identificar alguns pontos em algumas fotografias. Contudo, os pontos apresentaram um desvio médio padrão de 10 cm para coordenadas E e N.

Tabela 2 – Resultado da orientação exterior

Ponto	E	N	Desvio Padrão (m)
1	283521,44680	9121365,36305	±0,07539
2	283521,46626	9121365,72044	±0,09678
3	283521,64108	9121366,21232	±0,11657
4	283521,96951	9121365,97474	±0,00820
5	283522,72330	9121366,05611	±0,13343
6	283522,87324	9121365,51671	±0,13374
7	283522,16303	9121365,40874	±0,10178

Para realização da captura das imagens foi escolhido um dia e horário com variação da luz solar e da cobertura de nuvens. Cuidados ocorreram na aquisição das fotografias com a sobreposição citada para ver os objetos em diferentes ângulos. Na aerotriangulação, algumas fotos foram desconsideradas, pois apresentavam problemas relacionados ao reflexo do sol no espelho d'água. A figura 9 apresenta o resultado final do processamento.

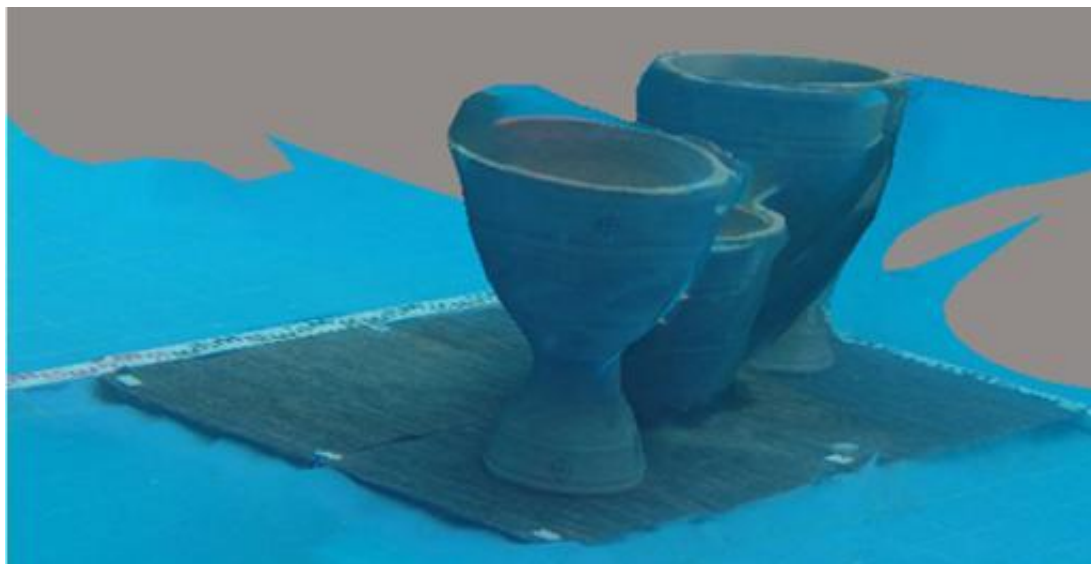


Figura 9 – Resultado da representação tridimensional

Na figura 9 são apresentados os objetos tridimensionais modelados no fundo da piscina, sendo possível a visualização dos três vasos sobre plataforma de pedra e régua graduada. Apesar de todos os problemas encontrados na captura de fotografias em ambiente aquático, principalmente nas áreas de cor do azul devido a falta de pontos de controle e ondulações inevitáveis no fundo, o modelo tridimensional apresentou resultados esperados para uma análise fotogramétrica, sendo possível dimensionar e avaliar a qualidade do objeto processado.

A figura 10 apresenta os resultados métricos do modelo tridimensional com o auxílio das miras graduadas submersas.

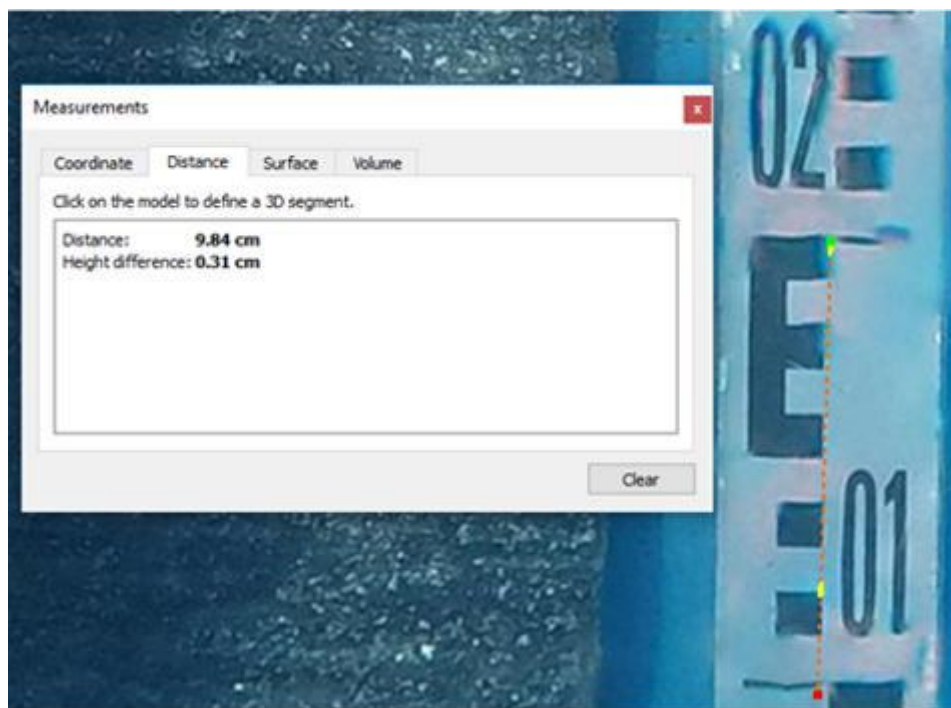


Figura 10 – Comparação entre a dimensão da mira e no modelo tridimensional

Comparado esses resultados com um intervalo da mira graduada colocada nas extremidades das placas de pedra, foi possível verificar as dimensões do objeto 3D, alcançando-se uma discrepância de 1,6 mm entre os valores medidos e o modelo digital.

4. Considerações finais

A fotogrametria subaquática apresenta uma grande evolução devido ao avanço da tecnologia e a multidisciplinaridade que esta ciência representa, podendo ser aplicada em diversas áreas. Neste artigo, são retratados passos do planejamento, aquisição e processamento das fotografias obtidas no ambiente subaquático. As fotografias foram tiradas com pouca profundidade e em boas condições ambientais, de iluminação e água com baixa interferência à passagem da luz.

Um dos fatores investigados no experimento analisou como a água afeta a formação de imagens através dos principais efeitos na sua formação: a refração, absorção e espalhamento. Tais efeitos interferem de forma direta nos produtos obtidos por esta técnica, seja na geração ou no processamento do modelo digital. Portanto, a partir dos resultados obtidos é explícito a necessidade de mais pesquisas na atenuação dos erros sistemáticos, para melhoria da modelagem e reconstrução tridimensional, principalmente em relação a refração da luz em diferentes ângulos e ambientes aquáticos.

O erro quadrático médio do modelo de pesquisa foi de ± 10 cm, a partir do uso de 7 pontos de controle na base para a orientação. O software utilizado foi eficiente na geração da imagem tridimensional detalhada dos objetos de estudo. A modelagem dos objetos seriam melhores com o uso de pontos de controle nos vasos, mas não aplicados

devido as dificuldades em obter as coordenadas para esses pontos. Apesar disso, o comparativo métrico entre a gradação das miras e os obtidos através do software dispôs diferenças milimétricas, validando a metodologia realizada.

Os atuais softwares de processamento digital tridimensional é um fator importante, tornando o levantamento, registro e disseminação da informação para trabalhos em ambientes aquáticos mais rápida e precisa. Contudo, a geração de softwares livres, produzido de forma colaborativa, ampliaria trabalhos e pesquisas na área e maiores compreensões do processamento.

Por fim, os resultados apresentados neste trabalho ratificam o uso da fotogrametria aplicada em ambientes subaquáticos, graças a simplicidade de implementação nos levantamentos, comparados ao uso de outras técnicas, em relação a melhoria da precisão, reconstrução tridimensional, objetos submersos, monitoramento e inspeção, além da diversidade de áreas que podem ser concedidas com uso das técnicas.

Referências

- ABADIE, A.; BOISSERY, P. & VIALA, C.** *Georeferenced underwater photogrammetry to map marine habitats and submerged*. The Photogrammetric Record Vol. 33, n.164, p. 448–469, 2018.
- BELTRAME, C. & COSTA, E.** *3D survey and modelling of shipwrecks in different underwater environments*. Journal of Cultural Heritage Vol. 29, p. 82-88, 2018.
- CALANTROPIO, A.; CHIABRANDO, F. & AURIEMMA, R.** *Photogrammetric underwater and uas surveys of archaeological sites: the case study of the roman shipwreck of Torre Santa Sabina*. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences; Gottingen Vol. XLIII-B2-2021, p. 643-650, 2021.
- COSTA, E.** *Survey and photogrammetry in underwater archaeological contexts at low visibility in the Venice lagoon*. Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage Vol. 24, 2022.
- CHEMISKY, B.; MENNA, F.; NOCERINO, E. & DRAP, P.** *"Underwater Survey for Oil and Gas Industry: A Review of Close Range Optical Methods*. Remote Sensing Vol. 13, n.14, p.1-31, 2021.
- DAMME, T. V.** *Computer Vision Photogrammetry for Underwater Archaeological Site Recording: A Critical Assessment*. Thesis, University os Southern Denmark, 2015.
- DIAMANTI, E.; SPONDYLIS, E.; VLACHAKI, F. & KOLYVA, E.** *Surveying the Underwater Arcaheological Site of Cape Glaros at Pagasetikos Gulf*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Vol. XLII-2/W3, 2017.
- DRAP, P.; MERAD, D.; HIJAZI, B.; GAOUA, L.; NAWAF, M. M.; SACCONI, M.; CHEMISKY, B.; SEINTURIER, J.; SOURISSEAU, J. C.; GAMBIN, T. & CASTRO, F.** *Underwater Photogrammetry and Object Modeling: A Case Study of Xlendi Wreck in Malta*. Sensors Vol. 15, n.12, p. 30351 - 30384, 2015.
- DRAP, P.; ROYER, J. P.; NAWAF, M. M., MERAD, D.; SANZ, A. L.; LEODOUX, J. B. & GARRABOU, J.** *Underwater Photogrammetry, Coded Target and Pleonoptic Technology: A set of Tools for Monitoring Red Coral in Mediterranean Sea in the Framework of the "Perfect" Project*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Vol. XLII-2/W3, 2017.
- FIGUEIRA, W.; FERRARI, F.; WEATHERBY, E.; PORTER, A.; HAWES, S. & BYRNE, M.** *Accuracy and precision of habitat structural complexity metrics derived from underwater photogrammetry*. Remote Sensing Vol. 7, n.12, p. 16883-16900, 2015.
- GUO, T.; CAPRA, A.; TROYER, M.; GRUEN, A.; BROOKS, A. J.; HENCH, J. L., SCHMITT, R. J.; HOLDBROOK, S. J. & DUBBINI, M.** *Accuracy Assessment of Underwater Photogrammetric Three-Dimensional Modelling for Coral Reefs*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Vol. XLI-B5, 2016.
- GUTIÉRREZ-ROMERO, J. E.; RUIZ-CAPEL, S.; ESTEVE-PÉREZ, J.; ZAMORA-PARRA, B. &**

LUNA-ABAD, J. P. *Methodology Based on Photogrammetry for Testing Ship-Block Resistance in Traditional Towing Tanks: Observations and Benchmark Data.* Journal of Marine Science and Engineering Vol. 10, n. 2 p.1-23, 2022.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; & WALKER, J. *Fundamentos de Física – vol.2 (Gravitação, Ondas e Termodinâmica).* 10. ed. Brasil: LTC, 2016.

JORDT, A. *Underwater 3D Reconstruction Based on Physical Models for Refraction and Underwater Light Propagation.* Dissertation, Faculty of Engineering, Kiel University, 2014.

MARRE, G.; HOLON F.; LUQUE S.; BOISSERY P. & DETER, J. *Monitoring Marine Habitats With Photogrammetry: A Cost-Effective, Accurate, Precise and High-Resolution Reconstruction Method.* Frontiers in Marine Science Vol. 06, n.276, p.1-15, 2019.

MCALLISTER, M. *The Problem with ‘Digital Realism’ in Underwater Archaeology: Photogrammetric Digital 3D Visualization and Interpretation.* Journal of Maritime Archaeology Vol. 22, n.16, p. 253–275, 2021.

NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física Básica, Vol. 2 Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor.* 5. ed. Brasil: Edgard Blucher, 2014.

OLINGER, L. K.; SCOTT, A. R.; MCMURRAY, S. E. & PAWLIK, J. R. *Growth estimates of Caribbean reef sponges on a shipwreck using 3D photogrammetry.* Scientific Reports Vol. 9, n.1, p.1-12, 2019.

OTERO, I.; EZQUERRA, A.; RODRÍGUEZ-SOLANO, R.; MARTÍN, L. & BACHILLER, I. *Fotogrametría y teledetección.* 1. ed. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, 2017.

RENDE, S. F.; BOSMAN, A.; MENNA, F.; LAGUDI, A.; BRUNO, F.; SEVERINO, U.; MONTEFALCONE, M.; IRVING, A. D.; RAIMONDI, V.; CALVO, S.; PERGENT, G.; CHRISTINE PERGENT-MARTINI, C. & TOMASELLO, A. *Assessing Seagrass Restoration Actions through a Micro-Bathymetry Survey Approach (Italy, Mediterranean Sea).* Water Vol. 14, p.1-27, 2022.

RAOULT, V. DAVID, P. A.; Dupont, S. F.; Mathewson, C. P.; O'Neill, S. J.; Powell, N. N. & Williamson, J. E. *GoPros™ as an underwater photogrammetry tool for citizen science.* PeerJ, p.1-18, 2016.

REBIKOFF, D. *Underwater Photography.* Congress in Switzerland, p. 1–8, 1968.

ROSCIAN, M; HERREL, A; CORNETTE, R; DELAPRÉ, A; CHEREL, Y. & ROUGET, I. *Underwater photogrammetry for close-range 3D imaging of dry-sensitive objects: The case study of cephalopod beaks.* Ecology and Evolution Vol. 11, n.12, p. 7730–7742, 2021.

RUMSON, A. G. *The application of fully unmanned robotic systems for inspection of subsea pipelines.* Ocean Engineering Vol. 235, p.1-20, 2021.

SALAZAR, J.; BUSCHINELLI, P.; MARCELLINO, G.; MACHADO, M.; RODRIGUES, H.; REGNER, D.; OLIVEIRA, D.; SANTOS, J.; MARINHO, C.; STEMMER, M. & PINTO, T. *3D photogrammetric inspection of risers using RPAs and deep learning in oil and gas offshore platforms.* ISPRS Vol. XLIII-B2-2020, p. 1265-1272, 2020.

TEMBA, P. *Fundamentos de Fotogrametria.* Universidade Federal de Minas Gerais, 2000.

URBINA-BARRETO, I.; ELISE, S.; GUILHAUMON, F.; BRUGGEMANN, J. H.; PINEL, R.; KULBICKI, M.; VIGLIOLA, L.; MOU-THAM, G.; MAHAMADALY, V.; FACON, M.; BUREAU, S.; PEIGNON, C.; DUTRIEUX, E.; GARNIER, R.; PENIN, L. & MEHDI ADJEROUD. *Underwater photogrammetry reveals new links between coral reefscape traits and fishes that ensure key functions.* Coastal and Marine Ecology Vol. 13, n. 2, p.1-18, 2022.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. & WILKINSON, B. E. *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS.* 4. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.

YA-BING, F.; GUI-PING, H.; GUI-QIN, Q. & ZHENG, C. *Underwater Photogrammetric Theoretical Equations and Technique.* Seventh International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation, p.1-8, 2011.

YAMAFUNE, K.; TORRES, R. & CASTRO, F. *Multi-Image Photogrammetry to Record and Reconstruct Underwater Shipwreck Sites.* Journal of Archaeological Method and Theory Vol. 24, p. 703–725, 2017.