



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E  
TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO

MARIANA SARAH SUICA TORRES

**FOTOGRAMETRIA SUBAQUÁTICA ALIADA A TÉCNICAS DE  
PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM COMO FERRAMENTA PARA A  
DOCUMENTAÇÃO DE NAUFRÁGIOS**

Recife  
2020

MARIANA SARAH SUICA TORRES

**FOTOGRAMETRIA SUBAQUÁTICA ALIADA A TÉCNICAS DE  
PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM COMO FERRAMENTA PARA A  
DOCUMENTAÇÃO DE NAUFRÁGIOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Área de concentração: Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Borba Schuler.

Recife

2020

Catálogo na Fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

T693f Torres, Mariana Sarah Suica.  
Fotogrametria subaquática aliada a técnicas de processamento digital de imagem como ferramenta para a documentação de naufrágios / Mariana Sarah Suica Torres. - 2020.  
90 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Borba Schuler.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2020.

Inclui Referências.

1. Engenharia Cartográfica. 2. Recife artificial. 3. Documentação. 4. *Structure from motion*. 5. Manipulação de imagem digital. I. Schuler, Carlos Alberto Borba (Orientador). II. Título

UFPE

526.1 CDD (22. ed.)

BCTG/2020-214

MARIANA SARAH SUICA TORRES

**FOTOGRAMETRIA SUBAQUÁTICA ALIADA A TÉCNICAS DE  
PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM COMO FERRAMENTA PARA A  
DOCUMENTAÇÃO DE NAUFRÁGIOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Aprovada em: 28/02/2020.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Carlos Alberto Borba Schuler (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Hernande Pereira da Silva (Examinador Externo)

Universidade Federal Rural de Pernambuco

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria das Neves Gregório (Examinadora Interna)

Secretaria de Educação e Esportes do Estado de Pernambuco

Dedico este trabalho aos que resistem: Aqueles que desafiam estatísticas, dificuldades e pessimismo ao entender que a vida é repleta de obstáculos, mas que o mundo pertence aos que persistem, se adaptam e se regeneram.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho é o resultado de muito esforço, mas reflexo da generosidade alheia e produto da gratidão que nutri por todos que passaram pelo meu caminho para acrescentar algo de bom a minha vida: Mostrando-me um caminho, auxiliando com uma dúvida, me fortalecendo como ser humano e me instruindo a continuar.

Sou muito grata a Deus por ter possibilitado estar aqui para viver esse momento que esperei (e sonhei) por muito tempo, pois todas as vezes que senti que tudo daria errado, situações inesperadas e positivas aconteceram e eu consegui me reerguer.

Agradeço muito a minha família, pois as etapas da minha vida mudam, mas sempre posso contar muita gente. Agradeço a minha mãe, Áurea Suica, a maior incentivadora que eu tenho, por ser essa pessoa tão resiliente e que me mostrou que saber levantar ao cair é mais importante do que não arriscar e se manter sempre em pé. Sou muito grata ao meu pai, Edvaldo Torres, por confiar cegamente nas minhas capacidades e habilidades, mesmo quando eu não acredito. Minha tia, Maria de Lourdes Suica, por acreditar e investir no meu aprendizado e por ter servido de modelo de mulher profissional e dedicada desde sempre. Agradeço também ao meu tio, Amarílio Suica, pela paciência que tem comigo e por facilitar tanto a minha vida acadêmica. Nunca vou esquecer das xerox, impressões e caronas para levantamentos de campo. Foi difícil, mas pelo menos tive a ajuda da Sofia.

Agradeço ainda aos meus tios, especialmente Débora, Maria das Graças Suica e Jacskon Suica, e meus primos, que são muitos, mas em especial a Thayse e Mirna Suica, que me ajudaram tanto durante minha vida escolar, Zayanne, parceira do Qgis, e Tainá Suica, que tem muita paciência durante as impressões. Ao Sendy Alves, pela paciência, por toda a ajuda, carinho, atenção, e que fez coisas incríveis por mim ao me mostrar que o esforço no ambiente acadêmico não é diferencial, é essencial.

Sou extremamente grata ao Prof. Dr. Carlos Alberto Borba Schuler pelos trabalhos infinitos, as boas ideias, as risadas e todo o investimento em mim. Não é exagero falar que sem ele, nada disso seria possível. Me recordo de ler os trabalhos dele quando estava na graduação e pensar que ser orientanda dele era um sonho quase inatingível, de tão distante. Muito obrigada, professor, palavras jamais irão expressar o suficiente.

Agradeço à Elizabeth Galdino por todo o serviço prestado, mas meu maior agradecimento é simplesmente por ela ser quem ela é. Uma pessoa leve, generosa,

gentil e que não mede esforços nunca para ajudar. Também sou grata ao Prof. Silvio Jacks, por todo o suporte e todas as dúvidas tiradas, assim como a Prof. Ana Lúcia Candeias.

Um agradecimento especial à Lais Suica e ao companheiro de casa Carlos Felipe, por me fornecerem materiais essenciais para realização deste trabalho. À Luana Barbosa e Janiele Monteiro, por tornarem a convivência tão leve, e aos meus companheiros de sala, que me inspiraram a evoluir sempre para acompanhar pessoas tão grandiosas no que fazem, em especial, Rhassanno Patriota, Rômulo Alexandrino, Tiago Holanda, Grenda Juara, Débora Carvalho, Rayane Fonseca e Carla lamara. Não poderei citar todos, mas admiro individualmente cada um.

Aos amigos inspiradores dentro e fora do meio acadêmico: Danilo Henrique, que me ajudou no meu momento mais difícil e está sempre presente com conselhos profissionais maravilhosos, assim como Wedja Oliveira, Maxsuel Bonfim, Marco Antônio de Albuquerque, Valter Vítor, José Augusto Alves, Yghor Vasconcelos, Marcos Santiago, Vinícius Almeida, e amigos da vida, Suellen Farias, Milena Limoeiro, Cecília Freitas, Jéssica Pompermayer, Caio Landeosi e Lucas Pires.

Ao Joel Calado, Suene Ramalho, Thales e Rodrigo Henrique pela experiência maravilhosa que tive na empresa Projeto Mar, retrato da eficiência e da responsabilidade, e sem eles este trabalho não teria sido realizado. Agradeço também ao Prof. Dr. Carlos Rios, da Fundação Paranã-Buc, que me deu tanto suporte para a realização da pesquisa e ao Prof. Dr. Múcio Banja por tirar tantas dúvidas.

Por fim, a todos que passaram pela minha vida e deixaram positividade, seja num discurso inspirador, em um momento de afeto ou palavra de conforto, o meu muito obrigada!

## RESUMO

Este estudo utilizou a fotogrametria subaquática como ferramenta para documentar e tridimensionalizar o naufrágio Servemar X, afundado a 25 metros de profundidade e localizado na costa de Pernambuco. Diferentemente de outras ramificações, tais como a aérea e a terrestre, a fotogrametria subaquática tem crescido de forma mais lenta por apresentar mais limitações físicas e metodológicas. Do aspecto metodológico, são encontradas dificuldades na produção científica de material com esta temática devido à falta de profissionais especializados. Do aspecto físico, o ambiente aquático infere outros desafios ao levantamento fotogramétrico, tais como a segurança, acessibilidade, existência de correntes, presença de partículas em suspensão, cardumes e a dificuldade de um posicionamento que possibilite o percorrimto de linhas fixas para a obtenção das fotografias. Neste contexto, este trabalho utilizou a chamada *Structure From Motion* como recurso à fotogrametria, já que permite uma maior flexibilização operacional em relação aos procedimentos em campo. As fotografias foram obtidas através de duas câmaras diferentes, uma DSLR, de modelo Nikon D5000 e outra de ação, de modelo SJ8 Plus, e foram pré-processadas utilizando técnicas de processamento digital de imagem (PDI), manualmente e automaticamente, evidenciando um melhor reconhecimento de padrões nas fotografias digitalmente processadas em relação às originais. Foi evidenciado que a câmara DSLR acoplada a uma mini-estação de luz artificial apresenta melhores resultados em relação a câmara de ação nos quesitos formação de geometria e cores apresentadas. No quesito textura, ambas apresentaram produtos próximos ao real, e no geral, foi demonstrado que para formação completa da geometria, mais fotografias deveriam ser utilizadas.

Palavras-chave: Recife artificial. Documentação. *Structure from motion*. Manipulação de imagem digital.

## **ABSTRACT**

This study used underwater photogrammetry as a resource to document and three-dimensionalize the Servemar X shipwreck, located at a depth of 25 meters in the Pernambuco coast. Unlike other ramifications, such terrestrial and aerial, underwater photogrammetry has been growing slowly, mainly because of physical and methodological limitations. From the methodological point of view, difficulties are found in the scientific material production regarding this theme due to the lack of specialized professionals. From the physical point of view, the aquatic environment causes other challenges to the photogrammetric survey, such as security, accessibility, tides, suspended solids, fish species and the difficulty of a positioning that allows a fix course for the photograph obtaining. In this context, this study used a photogrammetry resource called Structure From Motion, which allows a higher operational flexibilisation in field. The photographs were obtained through two different cameras, a Nikon D5000 DSLR and the SJ8 Plus action camera, and were preprocessed using digital image processing techniques, manually and automatically, showing a better pattern recognition in the processed photographs than in the original ones in the stereoscopic recognition. It was shown that the DSLR camera allied with a small artificial light station delivers better results than the action camera in the matters of geometry formation and colors. When it comes to texture, both delivered realistic products, and in general, it was shown that to obtain full geometry, more photographs should be used.

**Keywords:** Artificial reef. Documentation. Structure from motion. Digital image manipulation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Recife artificial no Golfo de Eilat .....	22
Figura 2 –	Isóbatas .....	25
Figura 3 –	Geometria da fotografia que permite calcular a área de cobertura .....	35
Figura 4 –	Geometria da formação da imagem .....	40
Figura 5 –	Classificação das paralaxes a partir das perspectivas de visualização dos objetos .....	41
Figura 6 –	Composição de uma imagem digital.....	42
Figura 7 –	Composição do padrão RGB.....	43
Figura 8 –	Comportamento das cores à medida que a profundidade aumenta .....	44
Figura 9 –	Alteração visual da cor em ambiente submerso .....	44
Figura 10 –	Alteração visual na imagem a partir do processamento digital .....	45
Figura 11 -	A autora portando os equipamentos do mergulho autônomo e a câmara SJ8 utilizada .....	48
Figura 12 –	Mergulhador Rodrigo Henrique com a câmara DSLR acoplada a estação de luz artificial.....	48
Figura 13 –	Mapa de localização do Servemar X .....	51
Figura 14 –	Representação do processo de tomada das fotografias .....	53
Figura 15–	Correspondência geométrica entre partes do navio em diferentes fotos.....	55
Figura 16 –	Marcação de pontos de controle.....	58
Figura 17–	Parâmetros intrínsecos calculados por código criado por Xiao (2014) .....	59
Figura 18 –	Diferenças entre fotografias que apresentam pontos semelhantes, mas aparência diferente em relação a uma foto e outra.....	62
Figura 19–	Fotografia de baixo contraste .....	63

Figura 20 –	Vida marinha registrada através da câmara SJ8 Plus.....	64
Figura 21–	Vida marinha registrada através da câmara DSLR.....	65
Figura 22 –	Foto original (a) e digitalmente processada (b) – Câmara DSLR com luz artificial .....	66
Figura 23–	Foto original (a) e digitalmente processada (b) – Câmara de ação.....	66
Figura 24 –	Demonstração do processo de alinhamento.....	71
Figura 25–	Valores calculados automaticamente pelo programa – Câmara de ação.....	72
Figura 26 –	Valores calculados utilizando o chessboard – Câmara de ação.....	73
Figura 27–	Calibração da câmara DSLR.....	74
Figura 28 –	Representação do número de fotografias sobrepostas sem pontos de controle e escala.....	75
Figura 29 –	Representação do número de fotografias sobrepostas com escala após adicionar informação métrica e pontos de controle.....	76
Figura 30 –	Textura reconstituída de parte da lateral do navio.....	77
Figura 31 –	Tridimensionalização do navio .....	78
Figura 32 –	Casco do Servemar X – Câmara de Ação .....	79

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Informações sobre o Servemar X .....	24
Quadro 2 –	Processos referentes ao sistema SfM .....	38
Quadro 3 –	Metodologia empregada .....	49
Quadro 4 –	Especificações do processamento .....	56
Quadro 5 –	Cálculo de cobertura fotogramétrica .....	60
Quadro 6 –	Valores máximos e mínimos dos pixels das fotografias da câmara DSLR digitalmente processadas .....	67
Quadro 7 –	Valores máximos e mínimos dos pixels das fotografias processadas da câmara de ação (SJ8) .....	68
Quadro 8 –	Comparação entre pontos correspondentes .....	69
Quadro 9 –	Sequências e resultados .....	70

## LISTA DE SIGLAS

ASPRS	American Society Of Photogrammetry And Remote Sensing
CIL	Centre For International Law
DSLR	Digital Single Lens Reflex
FAO	Food Agriculture And Organization Of The United Nations
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
PDI	Processamento Digital de Imagem
RPA	Remotely Piloted Aircraft
SFM	Structure From Motion
TIN	Triangular Irregular Network
UNEP	United Nations Environment Programme
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>18</b>
2.1	OBJETIVOS .....	19
2.1.1	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>19</b>
2.1.2	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>19</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>21</b>
3.1	RECIFES .....	21
3.2	RECIFES NATURAIS X ARTIFICIAIS .....	23
3.3	RECIFES ARTIFICIAIS EM PERNAMBUCO.....	24
3.4	BATIMETRIA LOCAL .....	25
3.5	REGULAÇÕES .....	26
3.5.1	<b>Acordos internacionais existentes</b> .....	<b>26</b>
3.5.2	<b>Diretrizes legais acerca do patrimônio subaquático do Brasil</b> .....	<b>28</b>
3.5.2.1	Controvérsias .....	29
3.5.3	<b>Licenciamento ambiental</b> .....	<b>30</b>
3.6	FOTOGRAMETRIA .....	31
3.6.1	<b>Divisões da fotogrametria</b> .....	<b>32</b>
3.6.2	<b>Classificações da fotogrametria</b> .....	<b>33</b>
3.6.3	<b>Fotogrametria subaquática</b> .....	<b>34</b>
3.7	STRUCTURE FROM MOTION.....	37
3.7.1	<b>Parâmetros do Structure from Motion</b> .....	<b>39</b>
3.8	A FORMAÇÃO DA IMAGEM.....	40
3.9	FORMAÇÃO DA IMAGEM DIGITAL.....	41
3.10	EFEITOS DA INTERAÇÃO DA LUZ COM O MEIO AQUÁTICO.....	43
3.10.1	<b>Técnicas de Processamento Digital de Imagem (PDI)</b> .....	<b>45</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>47</b>
4.1	MATERIAIS .....	47
4.2	MÉTODOS .....	49
4.2.1	<b>Levantamento bibliográfico</b> .....	<b>49</b>
4.2.1.1	Caracterização da área de estudo .....	50
4.2.2	<b>Planejamento</b> .....	<b>51</b>

<b>4.2.3</b>	<b>Aquisição dos dados</b> .....	<b>52</b>
4.2.3.1	Obtenção dos pares estereoscópicos .....	52
<b>4.2.4</b>	<b>Processamento</b> .....	<b>53</b>
4.2.4.1	Processamento Digital de Imagem (PDI) .....	53
<b>4.2.5</b>	<b>Processamento no Agisoft Metashape</b> .....	<b>55</b>
4.2.5.1	Alinhamento e inserção dos pontos de controle .....	56
4.2.5.2	Calibração e referenciação .....	58
4.2.5.3	Reconstrução 3D .....	59
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>60</b>
5.1	AQUISIÇÃO DAS FOTOGRAFIAS .....	60
5.2	FOTOGRAFIAS .....	60
<b>5.2.1</b>	<b>Imagens provenientes da câmara DSLR</b> .....	<b>61</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Imagens provenientes da câmara SJ8</b> .....	<b>62</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Elementos além do objeto: Vida marinha</b> .....	<b>63</b>
5.3	FILTRO ACE .....	65
5.4	LEITURA DE PIXELS ANTES E DEPOIS DO PROCESSAMENTO .....	67
5.5	PROCESSAMENTO DE DADOS .....	69
5.6	TRIDIMENSIONALIZAÇÃO .....	77
<b>5.6.1</b>	<b>Câmara DSLR</b> .....	<b>77</b>
<b>5.6.2</b>	<b>Câmara SJ8</b> .....	<b>80</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>80</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>82</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Calippo *et al.* (2013), ao longo do tempo, objetos naufragados foram considerados apenas um conjunto de destroços. Com o passar dos anos, através de novas descobertas tecnológicas e metodologias de estudo, estes objetos viraram interesse de diferentes setores. Do lado arqueológico, se tornam espaços onde podem ser recuperados conhecimentos e informações acerca do navio, do lado histórico, tornam-se bens de valor sentimental, e dentro do aspecto biológico, tornam-se estruturas que proporcionam a reprodução e manutenção de colônias e espécies.

Objetos submersos sofrem a ação concomitante de elementos da natureza e são passíveis de danos provenientes de toda uma esfera da ciência natural, onde elementos químicos, físicos e biológicos são fatores constantes na relação temporal incisiva entre conservação, deterioração e transformação. A partir do momento em que estes objetos se assentam no fundo marinho, um novo ecossistema é criado (SANTOS, 2006). Quando alguns objetos são submergidos, a exemplo dos navios, proporcionam, de acordo com Ng *et al.* (2017), substratos que facilitam o rápido crescimento da biota marinha, tais como corais e peixes.

Recife é considerada a capital brasileira dos naufrágios, e na plataforma continental que percorre as praias da região metropolitana, existe o conhecimento de mais de 70 embarcações fundeadas, 30 não localizadas e 9 afundadas propositalmente para estimular o turismo subaquático e a pesquisa científica (GALAMBA, 2008). Estas embarcações afundadas intencionalmente são chamadas de Recifes Artificiais, estruturas descritas por Rendle & Rodwell (2014) como elementos de engenharia costeira com a finalidade de promover a biodiversidade, a proteção da costa e o aumento da economia local. O naufrágio Servemar X foi um dos navios afundados propositalmente a cerca de 7,5 milhas da praia de Boa Viagem com o incentivo da empresa pernambucana Projeto Mar. De acordo com Carmo *et al.* (2010), as vantagens associadas à conservação e exploração de habitats através de embarcações afundadas em plataformas continentais são conhecidas desde longa data.

Os naufrágios são alvos de diferentes setores do conhecimento, mas a documentação referente a estes bens é, geralmente, escassa. Para Merlo & Konrad (2015), os documentos são a essência de uma organização, a memória de uma sociedade. Pensando no valor do arquivamento de dados, percebe-se a necessidade

de criar meios e adaptar metodologias existentes para que se adequem ao ambiente marinho. De acordo com Drap (2012), estes ambientes jamais estarão ao alcance não só do público em geral, mas inclusive pela maioria dos especialistas, logo, produtos tridimensionais são importantes para dar acessibilidade aos dados obtidos. Neste sentido, a fotogrametria propõe uma alternativa válida para a documentação de naufrágios.

A Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (ASPRS) define a fotogrametria como a arte, ciência e tecnologia para a obtenção de informação confiável acerca de objetos físicos e o ambiente, através do processo de gravação, medição e interpretação das imagens e das representações digitais dos padrões de energia derivados de sensores remotos (ASPRS, 1988). Esta tecnologia é relacionada ao processo de usar fotografias para determinar medições geométricas dos objetos (FOSTER; HALBSTEIN, 2014).

O ambiente aquático cria novos desafios em comparação com os levantamentos tradicionais em terra, por questões de acessibilidade, falta de conhecimento técnico, segurança e operabilidade dos equipamentos devido à diversos obstáculos, gerados, de acordo com Drap (2012), pela localização em mar aberto, criando uma situação que propicia a existência de vários fatores, tais como a falta de iluminação, menor temperatura e pouco oxigênio. Alguns destes elementos, quando combinados, deveriam, em teoria, ajudar a preservação dos naufrágios e poderiam facilitar o trabalho científico de exploradores, entretanto, muitas vezes a prática comercial irregular de mergulhos e o desenvolvimento de técnicas específicas acelera a degradação do naufrágio, e frequentemente, estes objetos naufragados serão destruídos antes mesmo que possam ser documentados (DRAP, 2012).

Considerando todas as limitações envolvidas, a aquisição das fotografias quanto no processamento, logo, minimizar o tempo de levantamento e de processamento faz-se necessário reduzir custos e quando se falta pessoal especializado para um trabalho em conjunto. Neste contexto, a denominada *Structure From Motion*, uma ramificação da fotogrametria tradicional, permite gerar produtos tridimensionais sem a necessidade obrigatória de estabelecer pontos de controle, reduzindo o tempo gasto nos levantamentos, além de permitir a obtenção de fotografias em linhas não fixas para recobrimento do objeto.

Para Torres *et al.* (2017), o primeiro passo para ter bons resultados na fotogrametria é obter boas fotografias. Entretanto, a luz não se comporta da mesma

maneira no ar e na água, afetando diretamente a qualidade das fotos obtidas, principalmente se o navio estiver a uma profundidade onde os tons vermelhos já não apareçam, a exemplo do objeto de estudo, situado a 25 metros. Berman *et al.* (2018) afirmaram que nesta profundidade, apenas tons azuis e verdes podem ser visualizados, e, conseqüentemente, registrados. O processamento digital de imagem permite resultados mais realistas, mais precisos, e por vezes, até necessário para que os softwares reconheçam e diferenciem padrões.

Este estudo tem como objetivo realizar uma reconstrução em 3D do navio Servemar X, aliando técnicas de posicionamento subaquático, obtenção de fotografias através da metodologia *Structure From Motion*, processamento de imagem digital e modelagem tridimensional.

## **2 JUSTIFICATIVA**

As dificuldades envolvidas no processo de submersão limitam o interesse popular e científico. Rambelli (2008) apresenta uma discrepância entre a percepção dos patrimônios emersos e submersos. Objetos submersos se localizam em uma posição desfavorável em relação ao patrimônio existente em superfície em termos de valor sentimental, considerando que estão localizados em zonas inacessíveis tanto para a população quanto para boa parte dos especialistas, interferindo no processo de construção da percepção, valor, identidade e de noção de funcionalidade. Esta situação desfavorável se estende, inclusive, ao conhecimento científico.

Drap *et al.* (2015) apontaram a acessibilidade como a razão fundamental para a falta de expansão científica. Raoult *et al.* (2016) complementaram a ideia, afirmando que existe um grave problema relacionado a escassez de profissionais especializados e metodologias simplificadas.

Com o desenvolvimento da tecnologia, de computadores e *softwares* de processamentos de dados, além do crescimento notório na aplicabilidade da fotogrametria aérea e terrestre, cresce também, em passos mais lentos, a ideia de aplicar conceitos e práticas fotogramétricas para estudos do patrimônio cultural em objetos submersos. Para Anelli *et al.* (2017), a fotogrametria representa uma ferramenta não destrutiva e de bom custo-benefício para ações de monitoramento, entretanto, esta aplicação em ambientes submersos se encontra em estágio inicial.

De acordo com o Artigo 20 da Constituição Federal do Brasil de 1988, são bens da União o mar territorial, as cavidades naturais subterrâneas e os sítios arqueológicos, assim como os recursos naturais da plataforma continental e da zona econômica exclusiva. O Artigo 48 da mesma constituição cita ainda que cabe ao congresso nacional dispor sobre os assuntos referentes ao espaço marítimo e dos bens da União (BRASIL, 2016).

Rambelli (2006) apontou diversas contradições legais no manuseio do patrimônio cultural subaquático do Brasil. Primeiramente, o autor evidenciou que o fato de que esses patrimônios são compreendidos de maneira diferente dos patrimônios emersos, os colocando em situação desfavorável, já que passam a ser gerenciados de outra forma. Segundamente, as contradições aparecem, de forma legal, quando as leis passaram a ser alteradas de maneira a possibilitar o abuso comercial, o que contraria a Convenção da Unesco de 2000, a Constituição Federal de 1988 e que permite a exploração de sítios sem critérios científicos arqueológicos.

O tempo é tanto agente incisivo de destruição como é de transformação, dentro do ambiente marinho. Logo, documentar se torna tarefa imprescindível para o arquivamento histórico e para a avaliação temporal do funcionamento da estrutura. Teague e Scott (2017) pontuam que monitorar estes ambientes é um processo constante de evolução. O armazenamento de informações e processamento de dados podem servir tanto como base para uma futura reconstrução, já que estes objetos ficarão por séculos nos oceanos, tanto para estudos quantitativos sobre a colonização e abrigo de espécies ou até mesmo a criação de material virtual para que a população tenha acesso a detalhes físicos do navio, o que implica em possíveis incentivos turísticos, de preservação, além de resgatar o caráter histórico. Embora os afundamentos destes navios tenham sido intencionais, em décadas ou até mesmo séculos farão parte da história de Pernambuco e do Brasil como elementos participadores da pesquisa científica e do turismo subaquático.

## 2.1 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo trazer um aprofundamento dentro de uma divisão menos explorada da fotogrametria, a subaquática, tendo como objetivo de estudo um dos recifes artificiais que compõem o Parque de Naufrágios de Pernambuco.

### 2.1.1 Objetivo geral

Desenvolver um estudo no naufrágio Servemar X utilizando a fotogrametria subaquática, a partir de posicionamento subaquático, processamento digital das fotografias e tridimensionalização.

### 2.1.2 Objetivos específicos

- a) Registrar o navio através da técnica *Structure From Motion* utilizando duas câmeras diferentes, uma, DSLR, e outra de ação, de modelo SJ8 Plus.
- b) Utilizar técnicas de processamento digital de imagem (PDI) para melhorar a qualidade das imagens e desenvolver um estudo acerca do comportamento dos pixels;

- c) Processar os pares estereoscópicos à fim de obter modelos tridimensionais;
- d) Avaliar a funcionalidade de uma câmara de ação de modelo SJ 8 Plus e sua eficácia na fotogrametria subaquática;
- e) Comparar os resultados gerados por ambas as câmaras.

### **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Este capítulo aborda temas fundamentais para o entendimento conceitual e prático do trabalho, apresentando recifes artificiais como elementos que podem facilitar a vida marinha oceânica, apresentando a legislação pertinente e explorando a fotogrametria subaquática como forma de documentar estes bens.

### 3.1 RECIFES

De acordo com Roche *et al.* (2016), as atividades recreacionais em recifes naturais têm experimentado rápido crescimento de popularidade e participação, entretanto, mesmo proporcionando aumento da atividade econômica para as comunidades costeiras, se tornam atividades impactantes, causando danos aos recifes de coral. Para Zainal & Mohamed (2014), embora os mergulhos recreativos representem um componente importante da indústria de turismo global, as áreas com recifes são vulneráveis, e estes podem ser danificados de acordo com o comportamento e atividade humana. Por exemplo, nadar muito próximo pode causar asfixia, falha no crescimento e diminuição da presença dos corais. Abelson & Shlesinger (2002) destacaram como um fator positivo a instalação de recifes artificiais em áreas onde os recifes naturais foram danificados.

O gerenciamento de atividades humanas como um elemento de assistência a tais ambientes, funcionando de forma a limitar atividades que possam impedir processos naturais de recuperação, já que recifes danificados por atividades antropogênicas, tais como excesso de pesca e ausência de nutrientes têm menos chances de recuperação por distúrbios de larga escala (AMMAR, 2009). Pratt (1994) adiciona que em muitos casos, o ecossistema jamais se recupera das perturbações antropogênicas. Al-Horani & Khalaf (2013) apresentaram a construção de recifes artificiais como a solução para a minimização dos impactos negativos aos recifes de coral causados por ação humana, tanto melhorando a produção e a biodiversidade quanto incentivando o turismo local. A UNEP (2009) pontuou ainda que recifes artificiais para mergulho podem contribuir para a conservação dos recifes naturais, evitando mergulhos e pesca nos entornos de recifes naturais.

Barnette (2017) define um recife artificial como qualquer estrutura feita pelo homem que simule os atributos de um recife natural. A utilização de estruturas artificiais para atração de peixes é datada em aproximadamente 3.000 anos atrás, quando rochas utilizadas como âncoras para a pesca de atum eram deixadas no leito

marinho no final de cada temporada de pesca no Mar Mediterrâneo (RIGGIO *et al.*, 2000). No Brasil, no ano de 2003, surgiu em Rio das Ostras, no estado do Rio de Janeiro, o primeiro projeto de recifes artificiais. Com o intuito de afastar pescadores de áreas próximas a uma plataforma da Petrobrás, foi monitorada durante seis anos, resgatando comprovadamente espécies locais de peixe como o cherne, o peroá e a enxada. No Paraná, populações de peixes ameaçados, como o Mero, retornaram ao litoral após a instalação destas estruturas aquáticas (ESTADÃO, 2013).

Segundo a FAO (2015) recifes artificiais têm servido para diversos propósitos, desde restauração do habitat e recuperação do estoque de peixes até pesquisa e atividades recreativas, e são estruturas submergidas ou parcialmente submergidas colocadas deliberadamente no leito marinho para desenvolver funções específicas, como que em uma simulação do ecossistema natural. Para Ng *et al.* (2017), estas estruturas proporcionam substratos que facilitam o crescimento da biota marinha, tais como corais e peixes. A Figura 1 apresenta um recife artificial no Golfo de Eilat, no Oriente Médio.

Figura 1 - Recife artificial no Golfo de Eilat



Fonte: Belhassen *et al.* (2017).

Podendo ser considerados intervenções de engenharia e tecnologia para recuperar ou ajudar no desenvolvimento de habitats naturais e facilitando o crescimento da produtividade, são utilizados para múltiplos propósitos, por exemplo, a proteção de habitats sensíveis à pesca predatória, restauração de ambientes esgotados, aumento da biodiversidade, criação de áreas propícias ao mergulho, pesquisas e recreação (FAO, 2015).

No turismo, recifes artificiais têm sido utilizados para atrair mergulhos recreacionais (BELHASSEN *et al.*, 2017). Para a UNEP (2009), navios afundados são

frequentemente utilizados para a criação de recifes e têm como vantagens poder proporcionar áreas interessantes para atividades recreativas, pesca esportiva, crescimento da economia da área e destaca que o custo de transformar um navio em recife artificial pode ser menos oneroso que o desmonte. O órgão apresenta ainda um aspecto essencial acerca da colocação de navios como recifes artificiais, a limpeza e a descontaminação antes da instalação.

### 3.2 RECIFES NATURAIS X ARTIFICIAIS

Sabe-se que recifes artificiais são possíveis soluções para mitigar impactos humanos nos sistemas costeiros, promovendo a biodiversidade. Avaliar a eficácia de estruturas artificiais para obter uma biodiversidade sustentável em recifes de coral é a chave para estimar seu papel na conservação dos corais ou gerenciamento (HIGGINS *et al.*, 2019). Questiona-se, então, o quão próximos são os efeitos dos recifes naturais e artificiais em ambiente marinho. Burt *et al.* (2009) apontaram um erro em comparações anteriores entre os dois tipos, ressaltando que por muitas vezes, estudos utilizavam objetos de estudo muito pequenos ou imaturos, se comparados com os recifes naturais. Os autores concluíram, comparando recifes naturais e artificiais extensos e com mais de 25 anos, que a cobertura de coral era maior em recifes artificiais, mas os naturais apresentaram maior riqueza em espécies.

Os testes de Ambrose & Swarbrirk (1989) com a finalidade de comparar recifes naturais e artificiais demonstraram que a riqueza e diversidade de espécies dos peixes não foram diferentes, e, no geral, as mesmas espécies foram encontradas nos dois ambientes.

A intenção ao implementar recifes artificiais não é substituir os recifes de corais, mas suprir a necessidade de sustentação da biodiversidade natural, prejudicada por eventos naturais ou ação humana. Segundo Harris (2009), o intuito é colocar a preservação e conservação como prioridade máxima, criando ecossistemas para substituir os que foram perdidos e recuperando os recifes naturais danificados.

### 3.3 RECIFES ARTIFICIAIS EM PERNAMBUCO

O litoral do Brasil possui mais de 2.000 embarcações afundadas (VICE, 2017). Sendo naufrágios causados pelo mau tempo ou funcionamento, erros grosseiros e

outras casualidades ou naufrágios intencionais, para criação de recifes artificiais, Pernambuco conta com inúmeros navios afundados, identificados e não identificados. O chamado Vapor de Baixo, por exemplo, está localizado em frente à praia de Olinda (SANTOS *et al.*, 2010), sem nenhum registro histórico oficial acerca dele. De acordo com Carvalho (2011), após um ano de preparação, o mergulhador Joel Calado, responsável pela escola de mergulho Projeto Mar, conseguiu o afundamento simultâneo de três rebocadores, Servemar X, Minuano e Lúpus. Estes navios foram afundados de forma totalmente legal, tendo sido limpos de contaminantes, vestígios de óleo e demais substâncias potencialmente nocivas.

O primeiro afundamento foi o do Servemar X, com informações apresentadas no Quadro 1, que teve suas válvulas abertas, levando aproximadamente 01h20 para submergir totalmente. Embora tenha sido afundado em 2002, ainda se encontra inteiro, e totalmente colonizado por diversas espécies. O naufrágio está localizado a 7,5 milhas da costa de Pernambuco (GALAMBA, 2008), a 25 metros de profundidade.

Quadro 1 – Informações sobre o Servemar X

Afundamento: 10.01.2002	Profundidade máxima: 25 metros
Local: Recife-PE 7,5 milhas da costa (Em frente à praia de Boa Viagem)	Propósito: Recife artificial
Localização: 08°07'19"S 34°45'46"W	Tipo de embarcação: Rebocador
	Material do casco: Aço

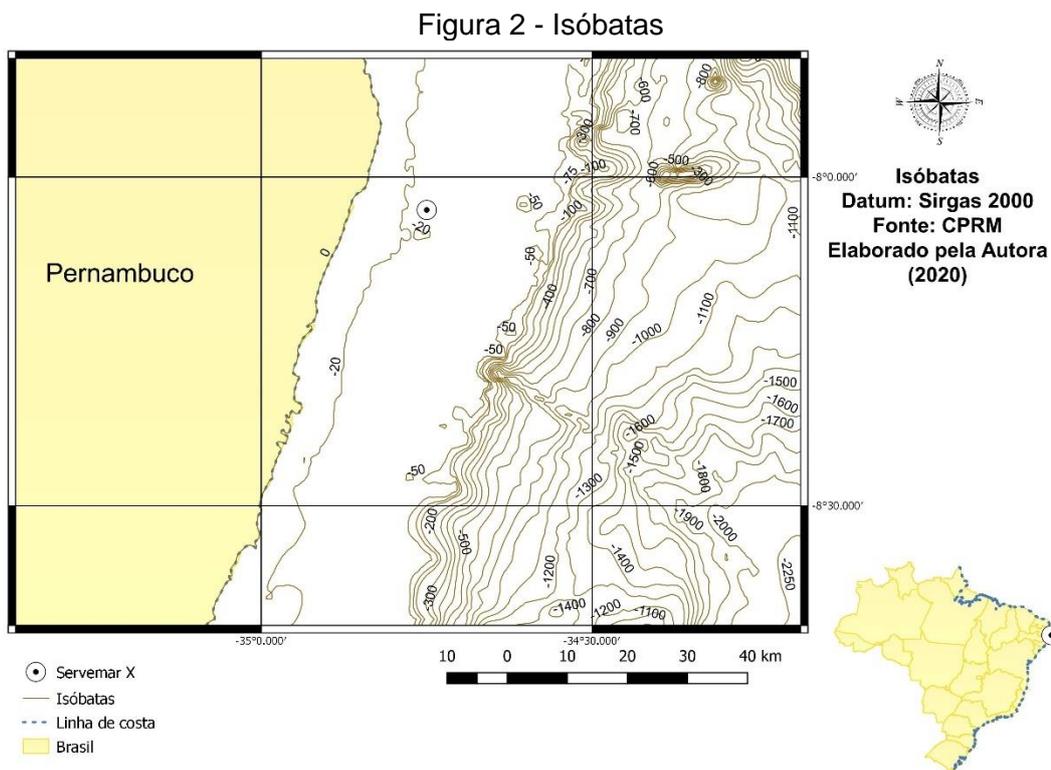
Fonte: Adaptado de Galamba (2008).

Em Pernambuco, a primeira embarcação afundada intencionalmente com o propósito de criar um recife artificial foi o rebocador Marte, em 1998, no litoral sul do estado (RIBAS, 2013). No período entre 1998 e 2017, foram afundados além dos naufrágios anteriormente citados os navios São José, Bellatrix, Phoenix, Taurus, Virgo, Walsa, Mercurius e Saveiros, que compõem o Parque dos Naufrágios de Pernambuco.

### 3.4 BATIMETRIA LOCAL

A FAO (2015) apontou a relação entre a batimetria e o funcionamento de recifes artificiais, enfatizando que as propriedades físicas devem ser levadas em consideração no ato de identificação da implantação do recife artificial, já que a profundidade e a turbidez da água afetam a penetração da luz, influenciando diretamente na colonização por algas e outros organismos. A temperatura da água também é relacionada a profundidade, devido ao fato de que águas quentes tendem a se situar acima das águas frias, criando um termoclima que representa uma barreira para alguns organismos.

A Figura 2 apresenta a localização do navio Servemar X, que está situado próximo à isóbata de 20 metros.



Fonte: A Autora (2020).

### 3.5 REGULATÓES

A proteção do ecossistema marinho foi pauta de inúmeras convenções e discussões em todo o mundo. Embora nem todas tratem particularmente da implantação de recifes artificiais, muitas discutiram e ratificaram acordos relacionados

à necessidade de estabelecer diretrizes para a proteção do mar contra danos gerados por diversas fontes, desde o depósito de materiais e resíduos no oceano até estabelecer planos de reabilitação.

No Brasil, destacam-se as leis 7.542/1986 e a 10.166/2000, além da Instrução Normativa do IBAMA, de Nº 22/2009, que dispõe acerca do licenciamento ambiental para instalação de recifes artificiais.

### **3.5.1 Acordos internacionais existentes**

A FAO (2015) destacou em particular três convenções, a convenção de Londres, que exclui objetos depositados intencionalmente no mar com alguma finalidade específica na categoria de despejo, o plano de ações no Mediterrâneo e a convenção de Bucareste. Existem ainda outras convenções e acordos, tais como a OSPAR.

#### **a) Convenção de Londres**

Em 1972, a convenção de Londres tratou da prevenção da poluição marinha através de depósitos de resíduos e outros elementos, materiais estes, que segundo a IMO (2006), não incluem os objetos colocados de propósito e com alguma finalidade. É, de acordo com a FAO (2015), uma das mais antigas do mundo para tratar da proteção do ambiente marinho contra as atividades humanas, tendo sido iniciada na década de 70, mas foi emendada nos anos de 1996 e 2006.

#### **b) Plano de ações do Mediterrâneo – Convenção de Barcelona**

Esta convenção foi baseada no intuito de proteger o mar mediterrâneo contra a poluição. Adotada em 1975, entrou em atividade em 1978, sendo revisada em 1995. Teve como objetivos principais o controle da poluição marinha, o gerenciamento sustentável dos recursos costeiros, a proteção do patrimônio cultural e material, e o desenvolvimento da qualidade de vida (FAO, 2015).

#### **c) Convenção de Bucareste**

Foi assinada em 1992 e ratificada pelos seis países do Mar Negro, Bulgária, Geórgia, Romênia, Federação Russa, Turquia e Ucrânia (COMISSÃO DO MAR NEGRO, 2009). A convenção ressaltava o interesse na conservação, exploração e desenvolvimento do potencial bioprodutivo do Mar Negro (CIL, 2017). Em 2009,

segundo a Comissão do Mar Negro (2009), foi desenvolvido um plano de ação estratégica para a proteção e reabilitação do ambiente do Mar Negro, baseada, entre outros princípios, na conservação, cuidado com a biodiversidade e habitats, redução da eutrofização, segurança ambiental na navegação e melhorias na qualidade da água.

d) OSPAR

OSPAR é um mecanismo formado por 15 países para cooperar em prol da proteção do ambiente marinho. Os governos envolvidos são Bélgica, Dinamarca, Finlândia, França, Alemanha, Islândia, Luxemburgo, os Países Baixos, Noruega, Portugal, Espanha, Suécia, Suíça e Reino Unido (OSPAR, 2015). Segundo a Agência Portuguesa do Meio Ambiente (2007), a convenção OSPAR ocorreu em 1992 e todas as partes signatárias concordaram com a atitude de tomar todas as medidas possíveis para proteger a área marítima contra efeitos adversos da atividade humana, conservando os ecossistemas marinhos, e tentar recuperar, quando possível, áreas que foram severamente danificadas.

e) Convenção da Unesco

A convenção da Unesco, que aconteceu em 2000, em Paris, foi pautada em assuntos relevantes para a proteção do patrimônio cultural subaquático, entre eles:

- a) Reconhecimento da importância do patrimônio cultural como parte do patrimônio da humanidade, sendo elemento relevante da história de nações, pessoas e da herança em comum;
- b) Percepção da importância da proteção e preservação do patrimônio subaquático e da responsabilidade dos Estados;
- c) Aumento do crescimento e da apreciação em relação a tais patrimônios por parte da população;
- d) Estabelecimento do valor da pesquisa, informação e educação;
- e) Conhecimento acerca das ameaças provenientes de atividades não autorizadas e a necessidade de estabelecer medidas de prevenção;
- f) Preocupação referente à exploração comercial;
- g) Consciência de que os avanços tecnológicos proporcionam melhor acessibilidade e descobrimentos ao patrimônio subaquático;

- h) Crença de que a cooperação entre os países, organizações científicas e acadêmicas, arqueólogos, mergulhadores e partes interessadas é essencial para a proteção dos bens submersos;
- i) Consideração de que práticas de mensuração e escavação requerem técnicas específicas para a aplicação de métodos científicos e necessitam de alto nível de especialização. (UNESCO, 2001).

Vale destacar que, em tal convenção, de acordo com Gusmão (2016), o Brasil não foi signatário.

### **3.5.2 Diretrizes legais acerca do patrimônio subaquático no Brasil**

Ao longo do tempo, algumas leis que tratam do patrimônio subaquático foram criadas e alteradas. Sartori (2015) pontuou um descompasso na legislação brasileira, que atua de maneira a contradizer a constituição ao permitir a exploração econômica destes patrimônios. Ainda segundo o autor, bens emersos com relevância cultural estão sob tutela do IPHAN, diferentemente dos submersos, gerenciados pela Marinha do Brasil, que permite, devido a atual legislação, a participação econômica, mesmo que parcial, do explorador brasileiro. Rambelli (2008) evidenciou esta exploração comercial como potencialmente maléfica, pontuando o abuso comercial.

Segundo a Unesco (2001), em muitos países, a falta de proteção legal significa que não existe nada que possa prevenir a exploração e apropriação de objetos de sítios submersos. Para a formulação da convenção de 2001, casos de estudo foram utilizados para compilar os ideais referentes a uma situação global melhor no gerenciamento do patrimônio submerso, tais como o Titanic, o HMS Pandora, que afundou na Austrália, em 1791, o navio francês La Juste, entre outros. Para Sartori (2015), já é uma realidade a utilização de casos internacionais com o intuito de mudar paradigmas sobre o direito de explorar bens submersos.

#### **3.5.2.1 Controvérsias**

A Lei 7.542/86, posteriormente alterada pela 10.166 de 2000, previa inicialmente que os objetos submersos permanecem sob tutela da União, não podendo ser doados, apropriados ou alienados e nem provendo pagamento de valor ao concessionário. A Lei 10.166/2000, por sua vez, alterou a lei de 86, não só removeu

a proibição de pagamento de valor como estipulou, no Artigo 20, §2, que o ato de autorização por meio da Marinha poderia estabelecer um valor para o pagamento de recompensas (BRASIL, 2000). Isto é visto por muitos como um incentivo a uma “caça ao tesouro”, amplamente desencorajada pela Convenção da Unesco (2001).

O Artigo 20 da Lei 7.542 previa que quem achasse objetos em terreno marítimo brasileiro não poderia clamar os achados para si, a não ser que fossem de sua propriedade anteriormente e que os objetos ainda não tenham sido alienados pela autoridade naval, pois passam a ser de posse da União depois de 5 anos (BRASIL, 1986). Entretanto, mesmo colocando estes bens sob tutela da União, a alteração de 2000 permite o pagamento a concessionários pelos achados (BRASIL, 2000). Rambelli (2008) enfatizou os perigos de “caçar tesouros”, problematizando a atividade e afirmando que são iniciativas destruidoras e comprovadas ameaças a herança comum da sociedade.

As opiniões nos meios político, acadêmico e profissional são bastante divergentes. Em 2008, surgiu uma proposta de lei da câmara (PLC) de Nº 45, proposta pela Deputada Federal Nice Lobão (SENADO DO BRASIL, 2008). Esta proposta eliminaria da Lei 10.166 os artigos 20 e 21, que tratavam basicamente de recompensa e pagamento de valores a concessionários. Nice Lobão, na redação da PLC no Senado do Brasil (2008), afirmou veementemente que era necessário fazer alterações devido ao fato de que a principal regulação sobre o patrimônio subaquático era do ano 2000, ou seja, anterior à Convenção da Unesco, ferindo os princípios determinados. Em contrapartida, Estevão Campelo em audiência pública do Senado do Brasil, enfatizou que seria um equívoco tomar uma decisão baseada em uma convenção na qual o país não foi signatário (SENADO DO BRASIL, 2012).

Para Mathuiy (2012), Capitão de Mar e Guerra da Marinha do Brasil, a PLC 45/2008 surgiu para preenchimento das lacunas existentes na Lei 7.542/1986 no que se refere à destinação final dos bens submersos. O autor descreve que esta PLC permite que cada um dos entes públicos atue dentro de sua atribuição, a Marinha, na segurança do tráfego aquaviário e o IPHAN, na fiscalização do patrimônio cultural brasileiro. Ainda para Mathuiy (2012), a Marinha concordou com a redação da PLC, entretanto, o projeto foi arquivado em 2008.

### **3.5.3 Licenciamento ambiental**

O IBAMA, através da Instrução Normativa de Nº 22, de julho de 2009, determinou as diretrizes acerca do licenciamento ambiental para instalação de Recifes Artificiais no mar territorial da zona exclusiva do Brasil. Neste regulamento, foi estabelecido que a implantação dos recifes artificiais no mar brasileiro tem como finalidades (IBAMA, 2009):

- a) O gerenciamento do uso dos recursos pesqueiros visando a produção, o ordenamento e o apoio à pesca e a agricultura;
- b) Conservação ou recuperação da biodiversidade e de habitats degradados;
- c) Pesquisa científica;
- d) Proteção da orla ou controle de erosão;
- e) Elaboração de fundos artificiais visando a conformação das ondas para a prática de esportes náuticos;
- f) Mergulho recreacional.

Ainda segundo o Ibama (2009), na seção III da Instrução Normativa, no Art. 10, é estabelecida a proibição de instalação dos recifes artificiais em locais que ameacem a integridade de formações recifais e demais habitats. No que se refere especificadamente às embarcações e plataformas *offshore*, é determinado que deverá ser apresentado ao órgão um plano logístico de descomissionamento, abrangendo todo tratamento para adequação, inclusive a remoção total de substâncias e materiais potencialmente poluentes (óleos, combustíveis, tintas, entre outros) e materiais que possam flutuar (garrafas, plásticos, vidros, baterias).

### 3.6 FOTOGRAMETRIA

A fotogrametria é definida como a arte, ciência e tecnologia para a obtenção de informação confiável acerca de objetos físicos e o ambiente, através do processo de gravação, medição e interpretação das imagens e das representações digitais dos padrões de energia derivados de sensores remotos (ASPRS, 1988). Schenk (2005) relacionou esta ciência à obtenção de informações confiáveis acerca das propriedades das superfícies e objetos, medindo e interpretando as informações adquiridas, sem a necessidade de contato físico direto. A palavra surgiu da junção das palavras gregas *phos* ou *phot*, que significam luz, *gramma*, que significa escritura, e *metrein*, que faz referência a medições.

É importante destacar que na fotogrametria os objetos são estudados sem serem tocados, o que explica o porquê de alguns autores enquadrarem esta ciência na mesma categoria do sensoriamento remoto (SEKER & DURAN, 2015).

Os primeiros levantamentos ocorreram pela primeira vez por volta de 1849 pelo engenheiro militar francês Aimé Laussedat, que desenvolveu um tipo de levantamento responsável por extrair, através de fotografias, as formas, as dimensões e as posições de objetos nela contidos (SILVA & SCHULER, 2015). Durante a primeira guerra mundial, as câmaras aéreas foram aperfeiçoadas, assim como os métodos de voo para aplicações fotogramétricas.

O desenvolvimento da tecnologia rendeu a informática um papel fundamental na fotogrametria, possibilitando a transformação de imagens analógicas em digitais (BUILL *et al.*, 2007). Inicia-se então a evolução da fotogrametria analógica para a fotogrametria digital, a partir da disseminação do manuseio de imagens gravadas e digitalizadas, o que gerou uma necessidade de adaptação da tecnologia a partir do desenvolvimento de soluções baseadas nesse tipo de imagem.

De acordo com Silva (2015), a fotogrametria pode ter diversas classificações, sendo as mais comuns a analógica, a analítica e a digital. Para Silva & Schuler (2015), somente na segunda metade do século XX foram desenvolvidos modelos matemáticos que são usados pela fotogrametria até a atualidade, pois o processo exigia um grande esforço computacional e máquinas com capacidade de processamento, o que não existia antes do avanço das tecnologias que permitiram que novas características fossem incorporadas à fotogrametria digital, que ainda assim preservou a essência da fotogrametria analítica.

### 3.6.1 Divisões da fotogrametria

Para Araujo (2005), a fotogrametria tem como alvo a reconstrução do espaço tridimensional (espaço-objeto) a partir de imagens bidimensionais (espaço-imagem), possuindo duas áreas distintas de atuação: a fotogrametria métrica e a fotogrametria interpretativa. A primeira relaciona-se à medição precisa a partir da fotografia determinando distâncias, ângulos, volumes, entre outros, consistindo, segundo Brandalize (2000), no processo de realização de medidas e computações para a determinação da forma e tamanho dos objetos.

Por sua vez, a fotogrametria interpretativa foca-se no reconhecimento e interpretação do espaço através de análise. Esta divisão da fotogrametria tem como objetivo primário o reconhecimento e a identificação de objetos e o julgamento de seu significado a partir de uma análise sistemática e cautelosa de fotografias. São métodos de fotointerpretação a foto-leitura, a foto-análise e a foto-dedução como técnicas para a fotointerpretação. A foto-leitura faz referência ao reconhecimento direto de objetos artificiais e características comuns do terreno, a foto-análise é a técnica de examinar o objeto através da separação e distinção de suas partes componentes, sendo a mais complexa das técnicas (TEMBA, 2000).

A fotointerpretação é uma atividade inerente ao processo de visualização humana. Sem caráter científico, pode ser realizada por qualquer pessoa. Isto é, com uma visão funcional, qualquer indivíduo pode olhar para uma imagem e perceber a representação de formas, tamanho, distâncias e cores (TOUTIN, 1997), mas em caráter científico, somente o profissional poderá atribuir e determinar significados reais. Sem treinamento, o observador comum pode analisar a fotografia de uma cidade e irá perceber as características formadoras do padrão da imagem, mas o especialista poderá observar a mesma imagem e perceber a degradação ambiental, a expansão urbana, o tipo de uso da terra e outras linhas de interesse.

Para Anderson (1982) *apud* Junqueira (2010), são passos essenciais para uma boa fotointerpretação o reconhecimento da área, a detecção daquilo que é importante, a análise para estabelecer limites e detectar aquilo que é importante, bem como a percepção de diferenças e similaridades para classificação.

Awange & Kiema (2013) descreveram alguns elementos do reconhecimento e interpretação das fotografias: Tom, tamanho, forma, textura, padrão, sombra e associação, sendo o tom o elemento mais importante, pois define a clareza dos

elementos da fotografia.

### 3.6.2 Classificações da fotogrametria

Tipicamente, a fotogrametria é dividida em terrestre (ou de curta-distância), aérea e orbital. O tipo de fotogrametria utilizada depende das características dos alvos de interesse, sendo a classificação primária baseada no meio de obtenção das fotografias, se tiradas a partir de aeromodelos (aviões, RPA's, balões), constitui-se a fotogrametria aérea, mas se obtidas no terreno, representando objetos naturais ou artificiais, é terrestre ou de curta-distância (STOJAKOVIC, 2008).

Preosck (2006) afirmou que praticamente a totalidade de mapeamentos fotogramétricos realizados no Brasil era realizada através de câmeras fotogramétricas analógicas, devido às dificuldades operacionais de utilizar outros meios de obtenção de dados com onerosas câmaras métricas. O autor ainda complementa que houve pouca mudança no processo produtivo e que se utilizavam os mesmos conceitos adquiridos com a fase analógica da fotogrametria. Treze anos se passaram desde 2006, e as técnicas fotogramétricas evoluíram, acompanhando a era digital. Embora o processo de estereoscopia mantenha os fundamentos de distanciamento e paralaxe e que para obtenção das fotografias ainda seja necessária a sobreposição, novas técnicas e equipamentos surgiram e se desenvolveram nesse espaço de tempo. As chamadas RPA's (Remoted Pilote Aircraft) são um exemplo.

As RPA's são aeronaves projetadas para operar sem piloto a bordo e que não tenham caráter recreativo, o que os diferencia sutilmente dos drones. O Governo Federal do Brasil (2017) apresentou inúmeras vantagens da utilização de RPA's para o monitoramento ambiental, agricultura, mineração e telecomunicações. Para Borges *et al.* (2017), em projetos de escala local, os aerolevantamentos tradicionais são bastante onerosos, e tais veículos são uma alternativa válida tanto para o mapeamento da superfície terrestre, tanto em esfera civil quanto militar. Um aspecto relevante acerca destes veículos é que, enquanto estruturas fixadas em aviões são responsáveis pelo mapeamento de áreas, RPA's são utilizadas também em objetos, a exemplo de levantamentos realizados em igrejas, como visto em Tondelo & Barth (2019).

Na fotogrametria terrestre ou de curta-distância, os objetos estão consideravelmente próximos à câmara, sejam eles igrejas, outros tipos de edifício,

navios, monumentos ou objetos menores de interesse. Recentemente, os desenvolvimentos em visão computacional e em fotogrametria colocaram em foco a fotogrametria subaquática (DRAP *et al.*, 2015). Assim como a fotogrametria terrestre, que atua em objetos e não em áreas, a fotogrametria subaquática se baseia na obtenção de fotografias de alvos específicos situados a curtas distâncias, de diferentes linhas de visão, produzindo pares estereoscópicos, estes gerados, de acordo com Siscoutto *et al.* (2004), a partir da obtenção de imagens geradas de forma que estejam posicionadas considerando a distância entre os olhos do observador e sequenciadas na horizontal.

### 3.6.3 Fotogrametria subaquática

A fotogrametria é conhecida como ciência da medição em fotos (LINDER, 2013), e de acordo com Foster & Halbstein (2014), está relacionada ao processo de usar fotografias para determinar medições geométricas dos objetos. Esta ciência experimentou várias fases, ao longo do tempo, permitindo que novas características e modelos matemáticos fossem incorporados através do avanço da tecnologia (SILVA; SCHULER, 2015). Por muitas décadas, a fotogrametria, comumente subdividida em aérea e terrestre, se encarregou de proporcionar estudos de diversos tipos e funcionalidades, tais como avaliações ambientais, monitoramento patrimonial, cadastro territorial urbano, locações de estradas, entre outras aplicações, ganhando impulsividade, segundo Silva (2015), pelo ganho de produtividade no mapeamento de grandes áreas em comparação com outros métodos de levantamento.

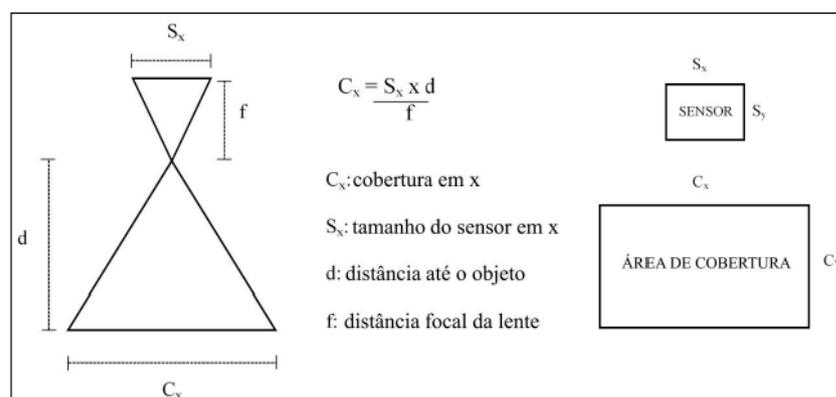
Com o surgimento de novas necessidades patrimoniais, mais particularmente referentes aos bens submersos, a fotogrametria passou a se apresentar como uma ferramenta que evolui ao passo do desenvolvimento recente da evolução de câmaras, processadores e computadores, como visto em Torres *et al.* (2017) que mencionam a qualidade das fotografias, uma boa escolha de câmaras, lentes e luzes artificiais como pré-requisitos para um levantamento eficaz.

Para Anelli *et al.* (2017), a fotogrametria representa uma ferramenta não destrutiva e de bom custo-benefício para ações de monitoramento, mas pontuam que em ambientes submersos, se encontra em estágio inicial. Drap *et al.* (2015) apontam a falta de informações e problemas relacionados à acessibilidade como a razão fundamental envolvendo a falta de expansão científica por parte de pesquisadores,

aumentando as ameaças aos sítios submersos e Raoult *et al.* (2016) apresentam outro problema: A falta de profissionais especializados e metodologias simplificadas.

Utilizando boa parte dos conceitos da fotogrametria terrestre, são os obstáculos que proporcionam o diferencial da fotogrametria subaquática. O primeiro é a acessibilidade, que é um problema constituído pelo ambiente em si, que depende da iluminação, profundidade, turbulência das águas e translado até o local, que nem sempre se encontra a curta distância da costa. Em todas as subdivisões da fotogrametria, a relação entre distância objeto e distância focal representa aspecto relevante, assumindo, para fotogrametrias de curta-distância, a seguinte relação para a área da cobertura (Figura 3):

Figura 3 - Geometria da fotogrametria que possibilita calcular a área de cobertura



Fonte: Torres *et. al* (2017).

Em terra, muitas vezes a dificuldade encontrada para a obtenção das fotografias é causada pela existência de obstáculos que impedem o distanciamento entre o alvo e a câmara, tais como a presença de pontos comerciais e residenciais, árvores, fiação elétrica, entre outros.

Em ambiente marinho, são diversas as dificuldades encontradas para a obtenção de boas fotos, tais como a existência de correntes marinhas, partículas em suspensão, a presença de cardumes e a forma como a luz é conduzida a partir da profundidade. A 25 metros de profundidade, todos os detalhes das fotografias são vistos em tons de azul (BERMAN *et al.*, 2018), perdendo o aspecto realista e ocultando a presença dos corais. Neste sentido, o processamento digital de imagem pode fazer a diferença no resultado do produto. Guidi *et al.* (2014) propuseram a ideia de que a

aplicação de filtros poderia aumentar a qualidade da imagem utilizada no processo fotogramétrico.

A noção de percepção de cores sob profundidade é uma questão complexa, tendo em vista que embora todos os objetos sejam visualizados em tons de azul à uma profundidade de 25 metros, continuam tendo tonalidades diferentes da maneira que se apresentam. Realçar as cores existentes, porém não vistas, pode servir inclusive para a classificação de cobertura do navio, subsidiando estudos espaço-temporais. No que se refere ao monitoramento patrimonial do naufrágio, ter acesso à coloração natural produz resultados mais realistas. Neste sentido, a manipulação digital da imagem se faz uma ferramenta valorosa.

Em ambiente submerso, os levantamentos fotogramétricos são representados por aspectos físicos naturais, como a existência de turbidez na água e a existência de partículas, mencionadas por Teague & Scott (2017). Para Chagas (2015), tais partículas geram turbidez e reduzem a transparência do meio líquido, dificultando a passagem dos raios solares pela água.

Para as reconstruções fotogramétricas, além da relação entre a distância focal, distância imagem e distância objeto, é necessário que as imagens consecutivas e que apresentem pontos em comum apresentem uma sobreposição mínima de 60% (TORRES *et al.*, 2017). Tais pontos em comum, presentes e foto identificáveis, são chamados de pontos homólogos (DINIZ, 2016), e no processo de levantamento fotogramétrico, as fotografias são obtidas através de ao menos duas perspectivas diferentes, denominadas linhas de visão, que devem ser, de acordo com Sládková *et al.* (2011), perpendiculares ao terreno.

Diferentemente da fotogrametria aérea, que foca particularmente no estudo de áreas, tanto a fotogrametria terrestre quanto a fotogrametria subaquática têm foco em objetos. De acordo com Cooper e Robson (1996) *apud* Calado & Schuler (2010), a fotogrametria de curta-distância é responsável pela reconstrução de superfícies de objetos cuja distância entre ele e a câmara seja inferior a 100 metros. Segundo Teague & Scott (2017), monitorar o ambiente marinho é um campo em infinito processo de evolução de métodos e técnicas, sendo a fotogrametria um dos últimos avanços na gravação e quantificação de dados.

A primeira geração de câmaras digitais abrigava severos defeitos relacionados à distorção, especialmente em Z, o que implicava em significativa distorção em altura (Agiv *et al.*, 2008). Câmaras de ação, geralmente equipadas com lentes do tipo *fish-*

eye, usualmente possibilitam a obtenção de fotos em ambiente profundo (até 40 metros) com a utilização de caixa estanque, entretanto, estudos não conseguem entrar em consenso sobre a aplicabilidade destas câmaras dentro do contexto métrico da fotogrametria subaquática.

Segundo Schenk (2005), no processo de calibração da câmara, é determinada a orientação interior, que descreve as características métricas internas. Os elementos de orientação interior são as coordenadas ou as distancias entre si das marcas fiduciais, a distância focal da câmara, a distorção radial das lentes e a resolução da câmara. Para Kraszewski (2011), de um ponto de vista fotogramétrico, câmaras digitais não métricas possuem orientação interna instável, mas depois da calibração podem ser utilizadas para processos métricos, tornando-se bastante populares em diversas aplicações da fotogrametria, substituindo as câmaras métricas a baixo custo.

### 3.7 STRUCTURE FROM MOTION

Tradicionalmente, a fotogrametria tem sido utilizada em conjunto com GPS e estação total, e mais recentemente, *Vant's* e *Laser Scanner* têm sido empregados para coletar pontos de alta resolução em forma de nuvens de pontos 3D. Entretanto, a maioria destas técnicas requerem equipamentos caros. Com o avanço da visão computacional e análise de imagem, surge uma nova maneira de adquirir dados dentro da fotogrametria, chamada de *Structure From Motion*. Em contraste aos métodos fotogramétricos tradicionais, permite uma flexibilidade maior de controle do usuário, além de baratear o processo (NYIMBILI *et al.*, 2016).

O SfM é um método que permite a utilização de uma única câmara, com inúmeras imagens coletadas por vários pontos de visão e distância (LI *et al.*, 2018). De acordo com Micheletti *et al.* (2015), assim como na fotogrametria tradicional, este método emprega imagens sobrepostas adquiridas de diversos pontos, porém difere da fotogrametria tradicional no fato de que utiliza a geometria interna da câmara e sua orientação sem a necessidade absoluta de pontos de controle no terreno. Neste processo, a calibração da câmara é essencial, tendo como principais parâmetros:

$F_x, F_y$ : Dimensões x e y da distância focal medida em pixels,

$C_x, C_y$ : Coordenadas dos pontos principais;

Inclinação: Coeficiente de transformação;

K1, k2, k3, k4: Coeficientes de distorção radial;

P1, p2, p3, p4: Coeficientes de distorção tangencial.

(SEEMAN; SALAMA, 2019).

Segundo Shalaby *et al.* (2017), este método fotogramétrico envolve dois problemas principais: A determinação da posição da câmera e a estipulação do movimento a partir de posicionamentos conhecidos. Este meio fotogramétrico estima interações entre os múltiplos pontos de visão, buscando pontos e relações em comum para o rastreamento da geometria. A Figura 4 demonstra os processos relacionados ao *Structure From motion*.

Quadro 2- Processos referentes ao sistema SfM

1	Inserção da sequência de imagens
2	Extração e rastreamento de feições (geralmente pontos) <ul style="list-style-type: none"> <li>- Correspondência das feições via correlação, restrição do espaço</li> </ul>
3	Estimação da geometria 3D e do movimento da câmara <ul style="list-style-type: none"> <li>- Estimação da matriz fundamental</li> <li>- Reconstrução 3D</li> </ul>
4	Estimação da superfície do objeto baseada no movimento da câmara (diversos pontos de visão) <ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilizando pares estereoscópicos</li> <li>- Representação da superfície</li> </ul>

Fonte: Adaptado de Shalaby *et al.* (2017).

São diversos os meios de obtenção de geometria 3D através de SfM, desde que os parâmetros fotogramétricos de aquisição das fotografias sejam obedecidos.

Através de linguagem computacional e o chamado *computer vision*, pontos são identificados, comparados e relacionados entre si. Alguns softwares permitem a inserção de fotografias e modelagem em 3D através deste processo sem diretamente

ocupar o usuário com linguagens computacionais, tais como o Agisoft Metashape, Context Capture, MeshLab. Ou seja, conhecendo como funciona o modo correto de adquirir as fotografias, como calibrar a câmara e como manusear o software, o usuário não precisa pensar no algoritmo computacional que permite a criação da nuvem de pontos. Outra maneira de realizar este processo é manualmente, criando um código computacional.

### 3.7.1 Parâmetros do Structure from Motion

O método *Structure From Motion* e a reconstrução em 3D se baseiam na correspondência de pontos entre as imagens (MAYER, 2008). Ou seja, independentemente do modo do processamento de imagens, seja por código aberto, seja por algum software específico, a base desta metodologia é a identificação e reconhecimento de pontos homólogos.

Dados pontos em duas imagens, é estimada uma matriz fundamental  $F$ , relacionando-os. Se a orientação interior é conhecida, é possível identificar uma estimativa do movimento da câmara (rotação  $R$  e translação  $t$ ) e a posição 3D dos pontos compatíveis. Muitas vezes, a detecção e reconhecimento de pontos não é perfeita, reduzindo a qualidade do resultado final. Os pontos corretos (inliers) e incorretos (outliers) são separados, tentando chegar a um consenso para a estimação da matriz fundamental.

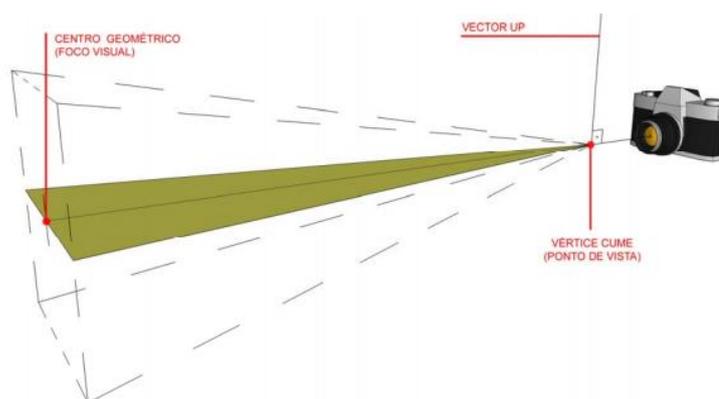
Dentre as várias maneiras de produzir nuvem densa de pontos para a posterior tridimensionalização, estatisticamente falando, o maior número de matches determina uma melhor estimação da matriz (LI *et al.*, 2018). Ou seja, quanto mais fotos inseridas, maior a probabilidade de correspondências, e com uma matriz  $F$  mais precisa, melhor é o resultado. Entretanto, um grande número de fotografias pode causar um mal funcionamento de alguns softwares, pela lentidão do processamento.

Com  $F$  determinada, é possível encontrar as posições relativas da câmara entre duas imagens, através da matriz essencial  $E$ , outra matriz  $3 \times 3$ , assim como  $F$ , mas com propriedades adicionais, utilizando a orientação interna da câmara. O posicionamento da câmara consiste em 6 graus de liberdade, rotação (Roll, Pitch, Yaw) e translação ( $X, Y, Z$ ) da câmara em relação ao exterior (SINGH, 2019).

## 3.8 A FORMAÇÃO DA IMAGEM

Segundo Malard *et al.* (2008), o mecanismo para captação de imagens através de máquinas fotográficas, câmaras filmadoras e o processo comum formador da visão correspondem ao vértice cume de uma pirâmide, onde o centro geométrico da base destes sólidos corresponde ao foco visual referente ao alvo a ser visualizado, os ângulos de abrangência do campo visual destes mecanismos correspondem aos ângulos limitados pelo cume e pelas faces inclinadas dos sólidos e o processo de orientação destes mecanismos é definido pela reta que liga o vértice cume da pirâmide (ponto de vista) ao centro geométrico da base (foco visual) e por uma reta normal, denominada *vector up*, ao plano que contém a reta suporte do ponto de vista e do foco visual. A Figura 4 representa o processo de formação de imagem a partir de uma câmara fotográfica.

Figura 4- Geometria da formação da imagem



Fonte: Malard *et al.* (2008).

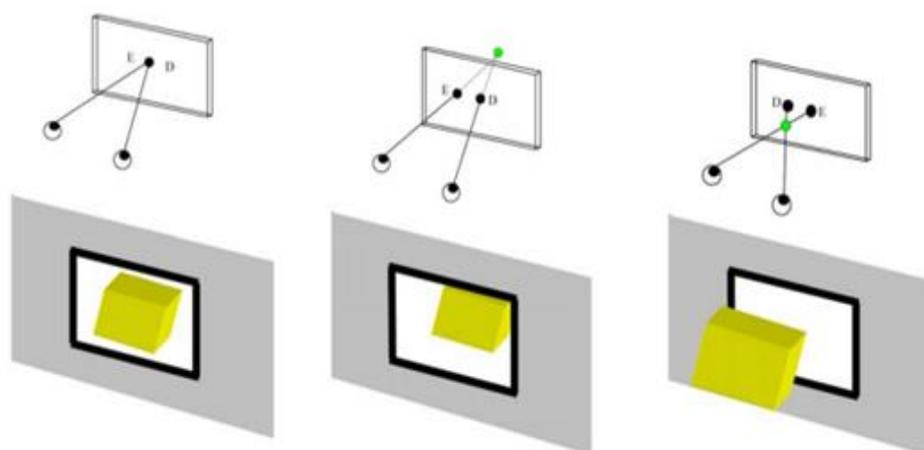
Existem diferenças na direção horizontal entre imagens formadas nas retinas de cada olho quando sobrepostas, sendo a disparidade zero para objetos onde os olhos convergem. Disparidade e paralaxe são entidades similares, sendo a disparidade medida na retina e a paralaxe na tela do computador (MALARD *et al.*, 2008).

A paralaxe é um termo utilizado para representar o deslocamento de um objeto em relação ao outro a partir de diferentes pontos de visada. De acordo com Kubik (2013), a fotogrametria utiliza o princípio da paralaxe para determinar as coordenadas do objeto de interesse. Philpot (2012) aponta a utilização da diferença entre a paralaxe absoluta para a determinação de elevação entre dois objetos, destacando também a paralaxe em Y como a diferença entre as distâncias perpendiculares de duas imagens correspondentes, onde a indicação de existência de paralaxe em Y indica uma

inclinação existente entre as fotografias, interferindo na observação estereoscópica. A paralaxe angular ou o ângulo de convergência são os ângulos percebidos pela base ocular do observador em relação ao objeto visado.

Malard *et al.* (2008) apresentam três classificações para a paralaxe, sendo a paralaxe zero referente a observação do objeto no plano da tela de projeção, a paralaxe positiva, onde o objeto é visto atrás do plano da tela e por fim, a paralaxe negativa, onde o objeto é visualizado a frente do plano da tela (Figura 5).

Figura 5 -Classificações das paralaxes a partir das perspectivas de visualização dos objetos



Fonte: Adaptada de Malard *et al.* (2008).

### 3.9 FORMAÇÃO DA IMAGEM DIGITAL

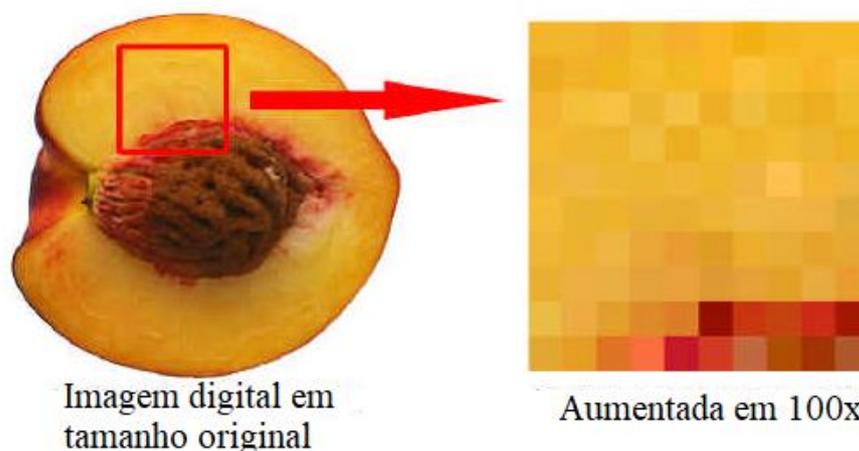
No contexto da computação gráfica, existem dois tipos de informação, visual e descritiva. A informação visual é, por exemplo, o que é visto na tela do computador, e a descritiva é referente ao modelo matemático que possibilita a representação dos objetos visualizados (SCURI, 1999).

De acordo com Fernandes (2016), o aparecimento da imagem digital está relacionado ao desenvolvimento do computador digital e das linguagens de programação dada a capacidade de armazenamento e do cálculo que estas exigem.

Ao ser digitalizada, a imagem assume um tamanho adimensional, em pixels, sendo o número de pixels = resolução x tamanho real (SCURI, 1999). Em termos de imagem digital, o número de pixels utilizados para compor a imagem digital é o que

define a resolução espacial. Segundo Scuri (1999), quando duas imagens com tamanhos reais são capturadas com resoluções diferentes, terão, conseqüentemente, números de pixels diferentes, afetando a visualização. Para Campos (2007), quanto mais pontos (que compõem os pixels) existirem, maior a qualidade da imagem. A Figura 6 representa a visualização da composição de uma imagem digital original e da mesma imagem, quando aumentada em 100x.

Figura 6 - Composição de uma imagem digital



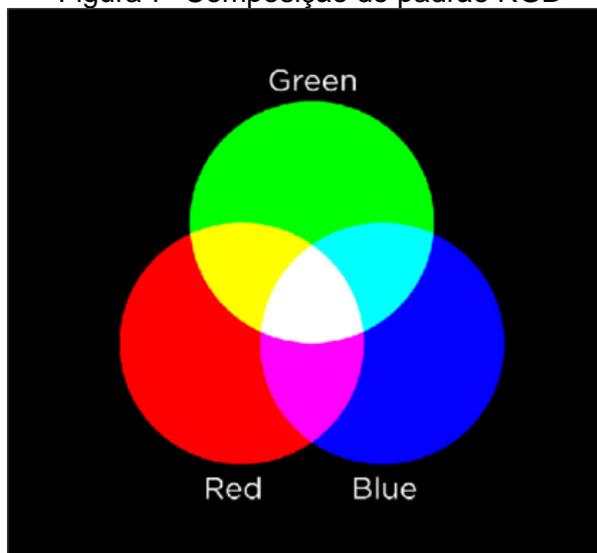
Fonte: Adaptada de Campos (2007).

Existem diferentes classes e tipos de imagem digital que são definidos de acordo com o seu formato, estando a classe da imagem diretamente relacionada com a quantidade de *bits* (dígito binário) e o intervalo de *bytes* (conjunto de 8 bits) por elemento em que se divide. Numa diferenciação básica, pode-se classificar as imagens como raster, também conhecido como bitmap, e vetorial. O processo de codificação digital de uma imagem raster consiste na divisão uniforme do plano da imagem numa grelha ou matriz finitas de células, conhecidas como pixels. A representação vetorial utiliza elementos geométricos e vetores (FERNANDES, 2016).

McMillan (2018) apresentou a ideia de que a melhora da imagem nada mais é do que um processo de manipulação de dados, aceitável desde que mudanças drásticas não sejam feitas ao conteúdo da imagem, que exista um aviso acerca da manipulação da imagem e que o autor do processamento esteja consciente das próprias falhas visuais (se existirem), por exemplo, sensibilidade a cor, daltonismo e eventuais problemas com a impressão, pois podem afetar a visualização dos padrões de cores. O padrão RGB (Figura 7) é, segundo Solomon & Breckon (2011), o mais

comum padrão de cores utilizado para a representação de imagens, sendo composto pelo canal vermelho (Red), azul (Blue) e verde (G).

Figura 7- Composição do padrão RGB



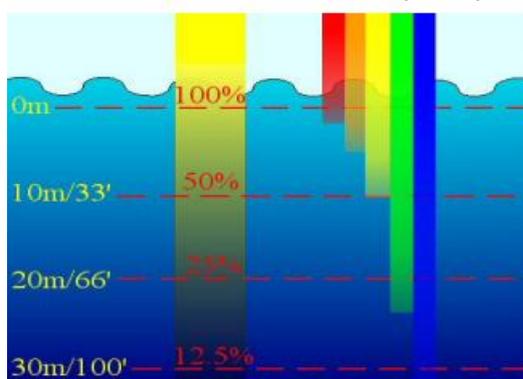
Fonte: Kultys (2013).

### 3.10 EFEITOS DA INTERAÇÃO DA LUZ COM O MEIO AQUÁTICO

De acordo com Garrison (2010), mesmo as águas perfeitamente limpas não são completamente transparentes. Zona fótica é a denominação atribuída à fina camada de água no topo da superfície, que pode se estender a até 200 metros de profundidade. Para o autor, a energia luminosa de algumas cores é convertida em calor mais perto da superfície que a energia luminosa de outras cores, sendo 71% da luz vermelha absorvida no primeiro metro da camada mais superficial dos oceanos, e os comprimentos das luzes laranja e amarela vão sendo absorvidos progressivamente com a profundidade. A luz azul, por sua vez, consegue viajar o suficiente pela coluna d'água para ser espalhada de volta por meio da superfície até os olhos do observador. Isto explica o motivo pelo qual as cores reais não são vistas da mesma maneira que seriam vistas na superfície.

Este efeito natural da dificuldade de propagação de tipos específicos de luz faz a cor azul ser predominante sobre as demais, já que as cores "se perdem" com o avanço da profundidade (Figura 8).

Figura 8- Comportamento das cores à medida que a profundidade aumenta



Fonte: Iqbal *et al.* (2007).

Sendo a absorção e propagação da luz são afetadas à medida que a profundidade aumenta, imagens subaquáticas são afetadas pelo processo de dissipação. A 10 metros de profundidade o vermelho já não aparece mais, o laranja se perde totalmente aos 25. Segundo Berman *et al.* (2018), tais imagens geralmente têm pouco contraste, justificando a necessidade de imagens digitalmente melhoradas, proporcionando maior acurácia, considerando que o comportamento da luz debaixo da água não é constante e varia geograficamente, sofrendo interferência do clima e das estações do ano. A Figura 9 demonstra a alteração visual das cores logo ao submergir e após uma profundidade de 5 metros.

Figura 9-Alteração visual da cor em ambiente submerso



Fonte: Berman *et al.* (2018).

Considerando que o comprimento de onda vermelho é o que é atenuado mais rápido, Galdrán *et al.* (2014), publicaram um estudo que focou na restauração do canal vermelho das fotografias através de algoritmos extensos, devolvendo uma aparência mais natural e menos azulada dos objetos (Figura 10).

Figura 10 - Alteração visual na imagem a partir do processamento digital



Fonte: Galdrán *et al.* (2014).

### 3.10.1 Técnicas de Processamento Digital de Imagem (PDI)

O processamento digital de imagens envolve as decisões referentes à manipulação, melhoramento ou extração de dados úteis da imagem (TYAGI, 2018). Técnicas de aprimoração da imagem são especialmente úteis no que se refere ao caso particular da fotogrametria subaquática, mas são utilizadas em diversas outras aplicações. Para Gonzales & Woods (2007), em tempos atuais, não existe sequer uma área que não seja ao menos minimamente impactada pelo processamento digital de imagem. As diversas técnicas de processamento de imagem incluem: Pré-processamento, *enhancement* (melhora), segmentação, extração e classificação (CHITRADEVI; SRIMATHI, 2014). De acordo com Muthuselvi & Prabhu (2016), geralmente a etapa de pré-processamento envolve a remoção e melhoramento das imagens a serem inseridas.

A fotogrametria subaquática permite a documentação e a tridimensionalização de objetos submersos, entretanto, somente uma única técnica não garante resultados extremamente próximos ao real. Para um levantamento fotogramétrico com foco na tridimensionalização de uma igreja antiga, por exemplo, talvez a cor não seja um aspecto tão relevante, mas para um levantamento focado em organismos marinhos, detecção e visualização de cor são essenciais.

Ao falar de cor de um ponto de vista físico, na realidade, fala-se da luz, que pode ser caracterizada pela distribuição espectral, possibilitando a modelagem matemática por uma função unidimensional que depende do comprimento de onda (SCURI, 1999). No entanto, em um sentido mais genérico, ela é caracterizada pela percepção humana de diferentes espectros de luz. Sabe-se que a cor é percebida de forma diferente por diferentes seres e é, segundo Kelber *et al.* (2003), uma experiência subjetiva.

Como foi visto anteriormente, em ambiente aquático e com profundidade suficiente para a perda da coloração natural, é irrealista esperar que somente com fotografias sem equipamentos específicos, elementos naturais das imagens, tais como esponjas e algas, possam ser visualizados. Entra em foco então o processamento digital, que permite diferentes processos com diferentes resultados, tais como melhoramento de cor, forma, alterações nos canais RGB, segmentação, classificação, entre outros. Kuber & Dixit (2014) enfatizaram que o propósito da melhora da qualidade da imagem é possibilitar uma melhor interpretação e percepção das imagens.

Para entender o processamento de imagens subaquáticas, é preciso considerar os parâmetros básicos de propagação da luz no meio, pois estas imagens são normalmente caracterizadas por baixo contraste e desfoque (GHANI; ISA, 2014).

Diversos autores apresentaram técnicas diferentes de melhora de qualidade das imagens subaquáticas no que se refere à proximidade com a realidade, ou seja, tons mais naturais e menos azulados, tais como Pizer *et al.* (1987); Zuiderveld *et al.* (1994); Getreuer (2012); Morel *et al.* (2014), Bianco (2015) e Berman & Avidan (2016), que com suas diferentes propostas para o processamento de imagem digital, contribuíram indiretamente para o chamado Imare Culture, projeto europeu que tem como objetivo propagar a cultura patrimonial marítima. Este projeto compilou as contribuições dos autores anteriormente citados e criou um *software* gratuito de melhoramento de imagem digital, fornecendo diferentes produtos, inclusive o filtro ACE, Automatic Contrast Equalization.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

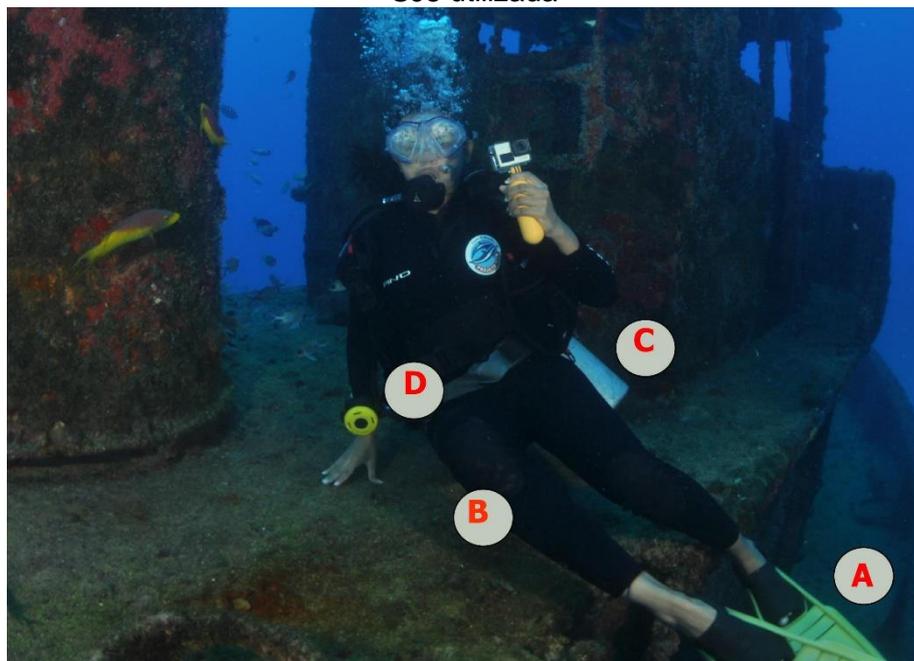
Este capítulo descreve os meios materiais e procedimentos metodológicos para a realização do trabalho. A seção 4.1 descreve os equipamentos utilizados, tanto para a realização dos mergulhos quanto para aquisição das imagens, e os demais tópicos descrevem os métodos empregados.

### 4.1 MATERIAIS

Para a aquisição dos pares estereoscópicos, foram utilizadas uma câmara de ação SJCAM SJ8 Plus, com sensor SONY IMX117, de 12 megapixels, distância focal de 3 mm e resolução de 30 *frames per second* e uma câmara DSLR Nikon D5000, com distância focal de 10mm, acoplada a uma mini-estação de luz artificial. Os mergulhos foram realizados no mês de outubro de 2019, com temperaturas próximas a 30 graus.

Foram utilizados os seguintes equipamentos para o mergulho autônomo, representados na Figura 11: Roupa de neoprene (a), cinto de lastro (b), cilindro (c), e nadadeiras (d). Para as etapas de processamento, foram utilizados os softwares *Matlab/Octave*, *Imare*, *Agisoft Metashape* (Versão Pro). O equipamento aliado a câmara DSLR é demonstrado na Figura 12.

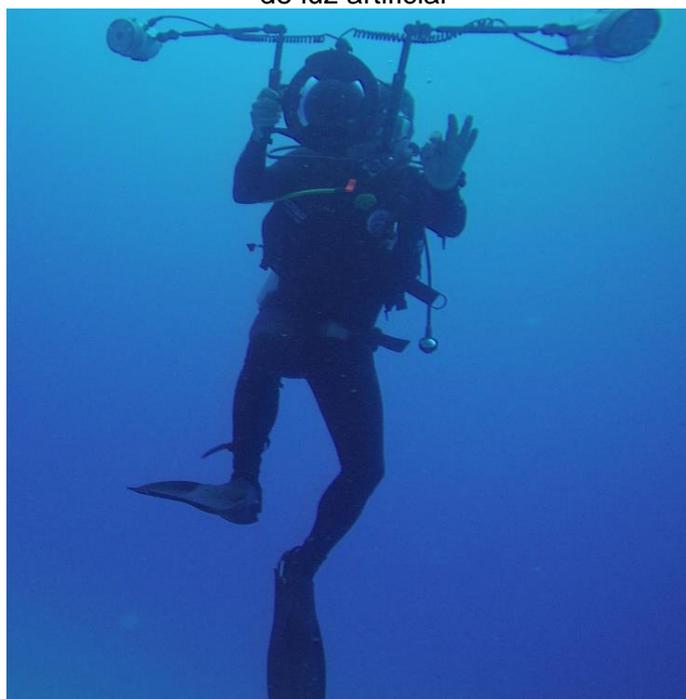
Figura 11- A autora portando os equipamentos do mergulho autônomo e a câmara SJ8 utilizada



- A - Nadadeiras
- B - Roupa de neoprene
- C - Cilindro
- D - Cinto de lastro

Fonte: Rodrigo Henrique (2020).

Figura 12 - Mergulhador Rodrigo Henrique com a câmara DSLR acoplada a estação de luz artificial



Fonte: A Autora (2020).

## 4.2 MÉTODOS

A primeira dificuldade foi encontrada na etapa de levantamento bibliográfico, devido ao fato de que existe pouca documentação acerca dos naufrágios, principalmente no Brasil. Verificou-se também que os estudos internacionais referentes à fotogrametria subaquática poderiam não se aplicar a uma realidade do presente trabalho. Diversos trabalhos, tais como Agrafiotis *et al.* (2018), Figueira *et al.* (2015) e Teague & Scott (2017) foram realizados em equipe e/ou em águas rasas.

Foram realizados 6 mergulhos, 4 de treinamento e reconhecimento de campo e 2 de levantamento fotogramétrico, totalizando 55 fotografias na câmara DSLR e 124 na câmara de ação. As fotografias foram obtidas de forma a obter recobrimento igual ou superior a 60%. A metodologia empregada foi descrita no Quadro 3.

Quadro 3 - Metodologia empregada

1	- Levantamento bibliográfico e escolha do naufrágio
2	- Planejamento
3	- Aquisição de dados
4	- Processamento
5	- Tridimensionalização

Fonte: A Autora (2020).

### 4.2.1 Levantamento bibliográfico

A falta de documentação acerca dos naufrágios no Brasil foi uma parte notória dentro do levantamento bibliográfico. Atualmente, a documentação e pesquisa no Brasil é baseada no trabalho de mergulhadores e acadêmicos, que representam pequena parcela da população. Maurício de Carvalho, que é gerenciador da plataforma SINAU, Sistemas de Informações de Naufrágios, é responsável por boa parte das informações disponíveis acerca de embarcações naufragadas. Joel Calado, da empresa pernambucana Projeto Mar, também é referência nos naufrágios, tendo

sido responsável, de acordo com Carvalho (2011), pelo afundamento de rebocadores com o propósito de torná-los recifes artificiais.

Durante a pesquisa, pôde-se verificar que seria necessário, para as próximas etapas, adaptar as pesquisas anteriores, principalmente internacionais, a este trabalho atual, modificando-os para a realidade local e, principalmente, operacional, pois pesquisas subaquáticas são onerosas.

#### 4.2.1.1 Caracterização da área de estudo

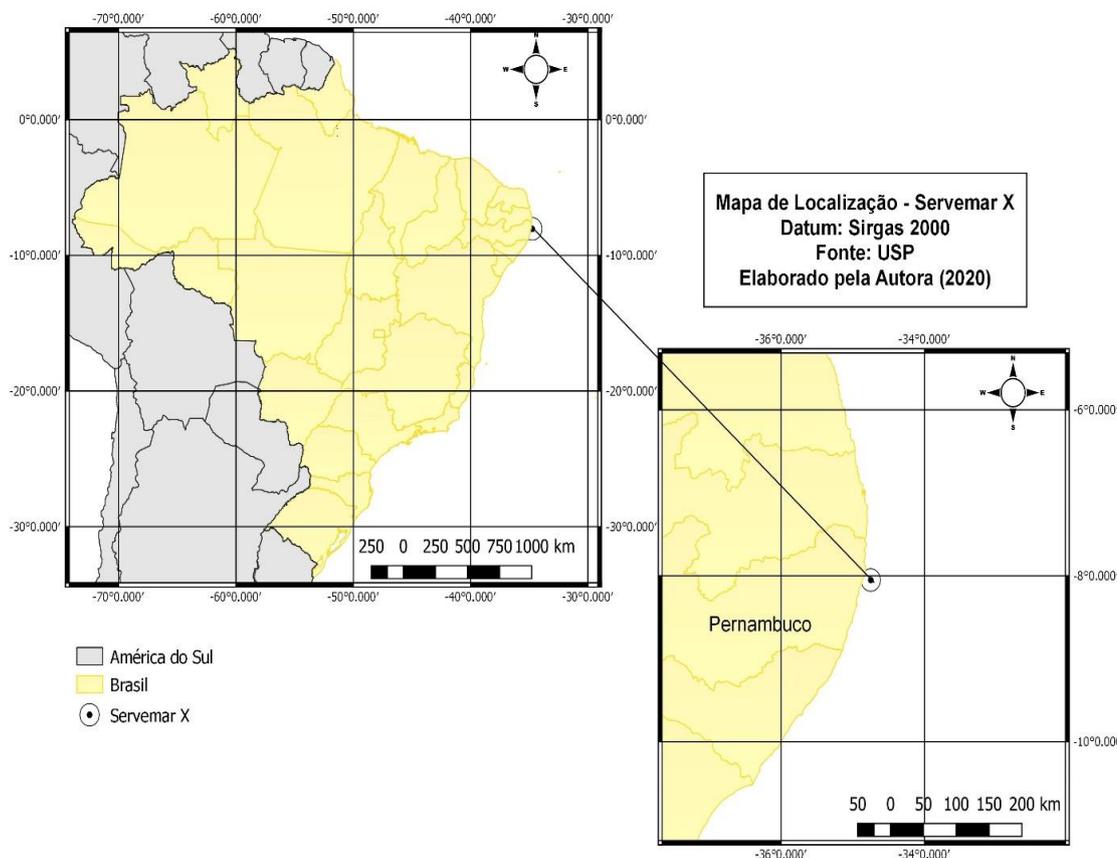
O estado de Pernambuco possui 187 km de faixa costeira, caracterizada por Manso *et al.* (2003) *apud* Azevedo (2017) por reduzida largura (33km), declive suave, pouca profundidade, águas relativamente quentes, elevada salinidade e apresenta quebra da plataforma entre -50 e -60m.

A cidade do Recife está situada no setor médio da costa de Pernambuco, e seu litoral compreende os bairros de Boa Viagem, Pina e Brasília Teimosa (GREGÓRIO, 2009). Devido ao alto número de embarcações afundadas em sua plataforma continental, é considerada a capital brasileira dos naufrágios, com crescente atividade turística no litoral, representando, conseqüentemente, ameaças sobre a estabilidade dos ecossistemas marinhos, sendo as áreas recifais as que mais sofrem com a pressão antrópica (GALAMBA, 2008).

A Zona Econômica Exclusiva Nordestina se encontra em uma região oceânica tropical, constituída por um sistema oligotrófico, que possui baixa produtividade biológica, mas uma teia alimentar complexa (EKAU & KNOPPERS, 1999, *apud* HAZIN, 2009).

A área de estudo se situa a 7,5 milhas da costa, em frente à praia de Boa Viagem (Figura 13).

Figura 13-Mapa de localização do Servemar X



Fonte: A Autora (2020).

#### 4.2.2 Planejamento

Através dos trabalhos de documentação de Carvalho (2011), pôde-se tomar conhecimento acerca de alguns naufrágios do Brasil, e particularmente, de Pernambuco. Através de uma troca de informações com a Fundação Paranã-buc e a empresa Projeto Mar, foi escolhido o naufrágio Servemar X, pois se situava na costa de Pernambuco, ainda continua em bom estado de conservação, e translados mensais eram oferecidos ao local do naufrágio.

Para a fotogrametria subaquática, é necessário conhecer as dimensões do objeto, e realizar o cálculo de cobertura fotogramétrica, para conhecer a quantidade mínima de fotos a serem obtidas. Embora a técnica *Structure From Motion* ofereça uma flexibilidade maior em relação à forma de posicionamento durante a obtenção das fotografias, ao menos o recobrimento mínimo (60%) deveria ser atingido.

### 4.2.3 Aquisição dos dados

Este tópico aborda a metodologia utilizada para adquirir e processar dados, desde a obtenção de pares estereoscópicos até a texturização do objeto.

#### 4.2.3.1 Obtenção de pares estereoscópicos

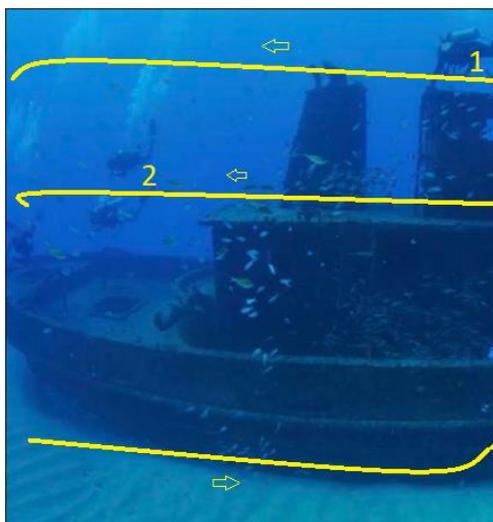
Após a descida pela corda de amarração, que liga uma parte do navio ao barco que transporta os mergulhadores ao sítio do naufrágio, deu-se início ao levantamento em si. Foi estabelecido que o percurso e a movimentação com a câmara ocorreriam de maneiras semelhantes, entretanto, havia uma preocupação maior com a câmara de ação, pois as fotografias seriam de menor qualidade. Durante o levantamento, foram obtidos pares estereoscópicos, ou seja, fotografias sequenciais com pontos em comum entre elas.

Em levantamentos tradicionais, por exemplo, utilizando a fotogrametria aérea, é comum inserir em campo elementos fotoidentificáveis, tanto para facilitar o processamento das fotografias, resultando em um melhor alinhamento, quanto para obter coordenadas dos pontos, adicionando ao projeto uma informação geoespacial. Particularmente neste trabalho, com os recursos disponíveis, esta metodologia não seria possível, pois seria inviável descer, colocar objetos fotoidentificáveis, obter as fotografias e retirar estes objetos no final do levantamento em apenas 21 minutos. Outro problema existente é que na profundidade de 25 metros, alvos que seriam fotoidentificáveis na superfície não necessariamente funcionariam abaixo da linha da água, já que existia uma grande probabilidade do software não conseguir diferenciar o alvo dos demais elementos presentes.

Para respeitar o tempo limite de fundo, o tempo limite em que o mergulhador pode permanecer em profundidade sem se colocar em riscos desnecessários à saúde, foi realizada uma parceria com outro mergulhador, que percorreu linhas semelhantes para a obtenção das fotografias, onde a autora utilizou a câmara de ação e o outro mergulhador utilizou a DSLR. A Figura 14 é uma representação ilustrativa do processo de aquisição das fotografias e o percurso feito pelos mergulhadores.

Após o levantamento subaquático, foi verificado que foram adquiridas 59 fotografias na câmara DSLR e 116 na câmara de ação.

Figura 14 - Representação do processo de tomada das fotografias



Fonte: Rodrigo Henrique (2020).

#### 4.2.4 Processamento

Ao falar em processamento, no contexto da fotogrametria subaquática, deve-se especificar o tipo. Dentro do software fotogramétrico, o processamento de dados envolve as etapas básicas para geração do modelo tridimensional, tais como a inserção de imagens, alinhamento, calibração, marcação de pontos de controle, construção das malhas poligonais e texturas.

Por sua vez, o Processamento Digital de Imagem (PDI) é referente à manipulação digital para servir a um propósito. No caso deste estudo, tornar o modelo tridimensional mais realista, no sentido de coloração, ao objeto real.

##### 4.2.4.1 Processamento Digital de Imagem (PDI)

Ao abrir as fotografias das duas câmaras, ficou evidenciado que os níveis de azul deveriam ser reduzidos. À priori, para quantificar, foi realizada uma leitura de pixels em uma única fotografia, evidenciando uma grande discrepância entre os canais R e B.

Considerando tamanha diferença entre os valores dos canais, testou-se uma sequência de alterações manuais no *software* Matlab exclusivamente no canal vermelho, multiplicando valores a sequência que corresponde ao canal R, resultando em uma melhora sutil no que se refere à aparição dos tons de vermelho. Foram

detectados os valores: 16 (correspondente ao vermelho), 187 (correspondente ao verde) e 243 (correspondente ao azul). A partir daí, foi elaborado um novo *script* para aumentar o valor do vermelho, melhorando a qualidade visual da fotografia.

Contudo, após vários testes, foi evidenciado que o método manual de equalização de fotografias não seria o ideal, pois o valor que seria multiplicado pelo canal R ideal para uma fotografia, não serviria para todas, exigindo outros valores e demandando mais tempo, devido ao número de imagens. Além de que, a mudança dos tons de vermelho foi pequena. A partir daí, utilizou-se o *Imare*, que apresentou grande vantagem, pois permite a inserção de um grande número de fotografias com resultados com qualidade semelhante. O *software* implementa um conjunto de algoritmos utilizados para o melhoramento de imagens subaquáticas, tendo sido desenvolvido utilizando linguagens escritas por pesquisadores que propuseram diferentes alternativas para o aumento da qualidade de imagens subaquáticas, tais como Getreuer (2012); Pizer *et. al* (1987); Zuiderveld *et al.* (1994); Bianco (2015), Berman & Avidan (2016) e Morel *et al.* (2014). Foi evidenciado que o conjunto de imagens provenientes da câmara DSLR apresentaram melhores tonalidades que as da câmara de ação.

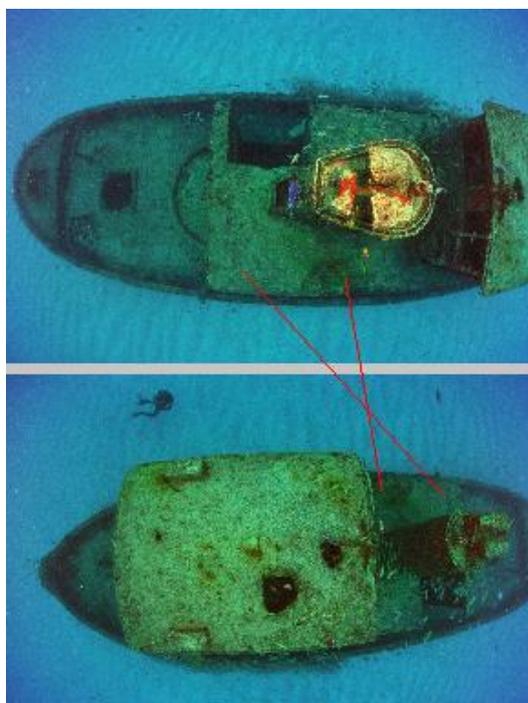
Não foi encontrado material comparativo em bibliografias consultadas acerca do comportamento dos pixels das imagens dentro do processamento de fotografias originais e processadas, embora alguns autores, tais como Kuber & Dixit (2014), pontuaram o valor do processo de melhora da qualidade associando à uma interpretação superior destas imagens. Buscou-se então quantificar os *matches*, correspondências entre os pares estereoscópicos, no *Matlab* e no *Metashape*. O propósito desta experiência não foi definir entre um software ou outro como superior em processamento, mas sim, ter uma noção do quanto os programas computacionais são ajudados ou prejudicados ao utilizar fotografias originais ou processadas durante a tentativa encontrar pontos correspondentes.

No *Matlab*, foram escolhidas 5 amostras de fotografias provenientes de cada câmara que formam pares estereoscópicos entre si, onde as fotografias 1-2-3-4-5 eram sequenciais, sendo a 1 o par do 2, e o 2 o par do 3, e assim consecutivamente. No total, 10 fotografias, 5 com filtro e 5 sem.

Utilizando o *Agisoft Metashape*, foram utilizadas 6 fotografias, 3 provenientes de cada câmara, com 3 pontos homólogos demarcados. Nas fotografias processadas, 3 fotografias foram alinhadas, e nas originais, apenas 2. O processo de alinhamento

normalmente garante que o software reconheceu os pares estereoscópicos e estabelece relações entre as partes do navio (Figura 15).

Figura 15- Correspondência geométrica entre partes do navio em diferentes fotos



Fonte: A Autora (2020).

Durante a etapa de pré-processamento, além da manipulação das imagens, foram removidas fotografias que não iriam contribuir positivamente para o resultado final, tais como fotografias de baixa qualidade, com cardumes, com outros mergulhadores e imagens desfocadas.

#### 4.2.5 Processamento no Agisoft Metashape

O levantamento de curta duração rendeu poucas fotografias devido ao tempo de fundo do levantamento, e depois da remoção de fotografias inúteis para o trabalho, percebeu-se que o número de imagens a serem utilizadas era baixo comparado a outros estudos fotogramétricos, entretanto, utilizando o cálculo para cobertura realizado na etapa do planejamento, foi verificado que o número era suficiente.

Seguiu-se a sequência descrita por Semaan & Salama (2019), que envolveu a inserção, alinhamento, calibração, formação de nuvem densa de pontos, mesh

(modelo poligonal 3D) e texturização, e adicionou-se ainda, a este processo, uma informação métrica acerca do comprimento do navio. Foram inseridas 51 fotografias da câmara DSLR e 84 da câmara de ação.

Esta redução em relação ao número de imagens adquiridas pelas câmaras de deu em razão de má qualidade da fotografia ou pela presença de cardumes.

O *Agisoft Metashape* fornece sequências pré-estabelecidas para a geração de produtos, mas proporciona, também, diversas configurações para processamento, que permitem ao usuário escolher a acurácia, nível de detalhes e o tempo de processamento. O Quadro 4 apresenta as configurações escolhidas.

Quadro 4 – Especificações do processamento

Alinhamento	Acurácia: Média
	Pré-seleção genérica
Calibração	Manual e Automática
Nuvem densa	Qualidade: Muito alta
	Filtragem suave
Mesh	Qualidade alta
	Contagem de feições alta
Texturização	Mapeamento genérico
	Mosaico

Fonte: A Autora (2020).

#### 4.2.5.1 Alinhamento e inserção de pontos de controle

A etapa de alinhamento é responsável pela estipulação da geometria e das linhas de percorrimento da câmara, ou seja, através da identificação e amarração de pontos homólogos, os *softwares* fotogramétricos podem reconhecer ou segregar elementos da cena ou do objeto que pareçam entre si ou sejam diferentes dos demais. De acordo com a Agisoft (2016), é nesta etapa que ocorre a definição da posição da

câmara e a orientação para cada foto, construindo assim o primeiro modelo tridimensional mais básico, a construção da nuvem de pontos esparsos. Após este processo, é possível identificar e eliminar, utilizando a formação da nuvem, fotografias que estejam posicionadas de maneira incorreta.

Foi verificado que mesmo com as imagens subaquáticas da mais alta qualidade, como as da câmara DSLR, por exemplo, o *software* tinha dificuldade de reconhecer e diferenciar padrões. Os primeiros testes apontaram que, de 51 fotografias utilizadas, apenas 11 foram alinhadas, ou seja, reconhecidas como sequenciais e com pontos (com dimensões x, y, z) em comum. Deu-se início a uma demarcação manual de pontos de controle.

Se em campo, são utilizados alvos fotoidentificáveis, escolheu-se utilizar elementos já presentes nas fotografias: Partes específicas do navio. Com isto, e sem informações georreferenciadas, o *software* estabelece distâncias entre os pontos atribuindo coordenadas arbitrárias, para assim, formar geometria. Foram demarcados 40 pontos de controle, entre eles, 2 com distância conhecida, medindo 17,2 metros, fornecida por Carvalho (2011). Este processo não foi realizado nas fotografias com a câmara de ação pois não houve geração linear completa do casco do navio, no caso, as extremidades não foram tridimensionadas.

A Figura 16 demonstra o processo de marcação de pontos de controle de forma manual, escolhendo elementos fotoidentificáveis e presentes em mais de uma fotografia.

Figura 16 - Marcação de pontos de controle



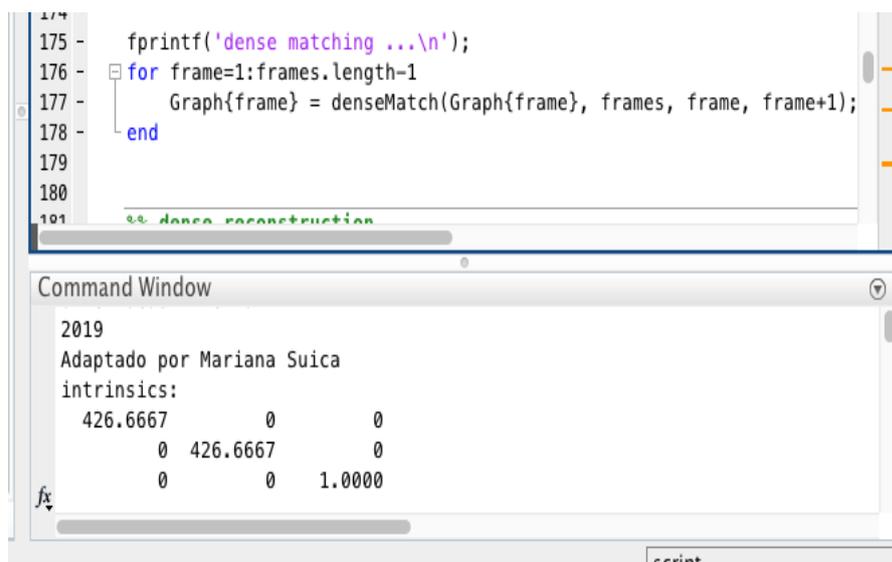
Fonte: A Autora (2020).

Foi seguida a sequência dada pela Agisoft (2015) para o processamento de dados utilizando escala, com precisão de 1 centímetro, sendo os pontos de controle os pontos com medida conhecida, sendo esta medida a distância entre as extremidades.

#### 4.2.5.2 Calibração e referenciação

A calibração reproduz os feixes e perspectivas internas da câmara. Existem várias formas de buscar a chamada orientação interna, por exemplo, utilizando softwares como o *Metashape* e o *Photomodeler*. Outra maneira é utilizar um código computacional que faça a leitura dos parâmetros intrínsecos (Figura 17).

Figura 17 - Parâmetros intrínsecos calculados por código criado por Xiao (2014)



```

175 - fprintf('dense matching ...\n');
176 - for frame=1:frames.length-1
177 -     Graph{frame} = denseMatch(Graph{frame}, frames, frame, frame+1);
178 - end
179
180
181 %% dense reconstruction

```

Command Window

```

2019
Adaptado por Mariana Suica
intrinsic:
  426.6667      0      0
      0 426.6667      0
      0      0  1.0000

```

Fonte: A Autora (2020)

Dentro do Agisoft Metashape, se o operador não insere os parâmetros intrínsecos da câmara, o software calcula automaticamente os valores do tamanho dos pixels e a distância focal. Caso o usuário prefira uma calibração mais precisa, o software disponibiliza também um *chessboard*, uma malha quadriculada, onde o operador fotografa com a câmara e insere no programa, alinhando as fotografias. Após a leitura, os valores são ajustados.

#### 4.2.5.3 Reconstrução 3D

As etapas seguintes envolveram a construção da nuvem densa, que produz pontos com coordenadas X,Y,Z, *mesh* (malha poligonal) e, por fim, a texturização, que fornece o modelo com acabamento fotorrealista. Estas etapas são mais efetivas se o operador acompanhar, aos poucos, a formação do objeto, etapa por etapa. Por exemplo, fotografias mal alinhadas ou com poucos pontos esparsos não gerarão um bom modelo final, já que tal produto leva em consideração as fotografias com pontos homólogos, onde o programa pôde ter a percepção de localização e de relação dos pontos com os vizinhos.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos no estudo, de acordo com as etapas metodológicas, com discussões acerca da aquisição, análise e processamento das fotografias, além da avaliação final dos produtos obtidos e comparação entre câmaras.

### 5.1 AQUISIÇÃO DAS FOTOGRAFIAS

Utilizando a geometria da fotogrametria proposta por Torres *et al.* (2017) e Seeman & Salama (2019), calculou-se que a cobertura obtida, demonstrada no Quadro 5. Este cálculo leva em consideração uma distância de obtenção das fotografias de 1 metro. Ou seja, considerando que o navio mede 17,2 metros, para a cobertura em X das laterais do navio Servemar X, seriam necessárias aproximadamente 11 fotografias para cada lateral utilizando a câmara DSLR e também 11 fotos para a câmara de ação (considerando Cx, Cy), admitindo-se, entretanto, a possibilidade de uma variação nesse valor, já que não seria possível controlar o distanciamento do objeto com exatidão no ambiente aquático.

Quadro 5 – Cálculo de cobertura fotogramétrica

	Cobertura em X (Cx)	Cobertura em Y (Cy)
DSLR	2,36	1,58
SJ8 Plus	2,08	1,55

Fonte: A Autora (2020)

### 5.2 FOTOGRAFIAS

Como visto anteriormente, as fotografias foram obtidas de duas câmaras diferentes, uma de ação, de modelo SJ8 Plus, e outra de modelo Nikon D5000, acoplada a uma estação de iluminação artificial. Por se tratarem de equipamentos distintos, onde um possuía recursos adicionais, resultados diferentes eram esperados,

porém buscou-se analisar a qualidade e o processamento das imagens para posterior comparação.

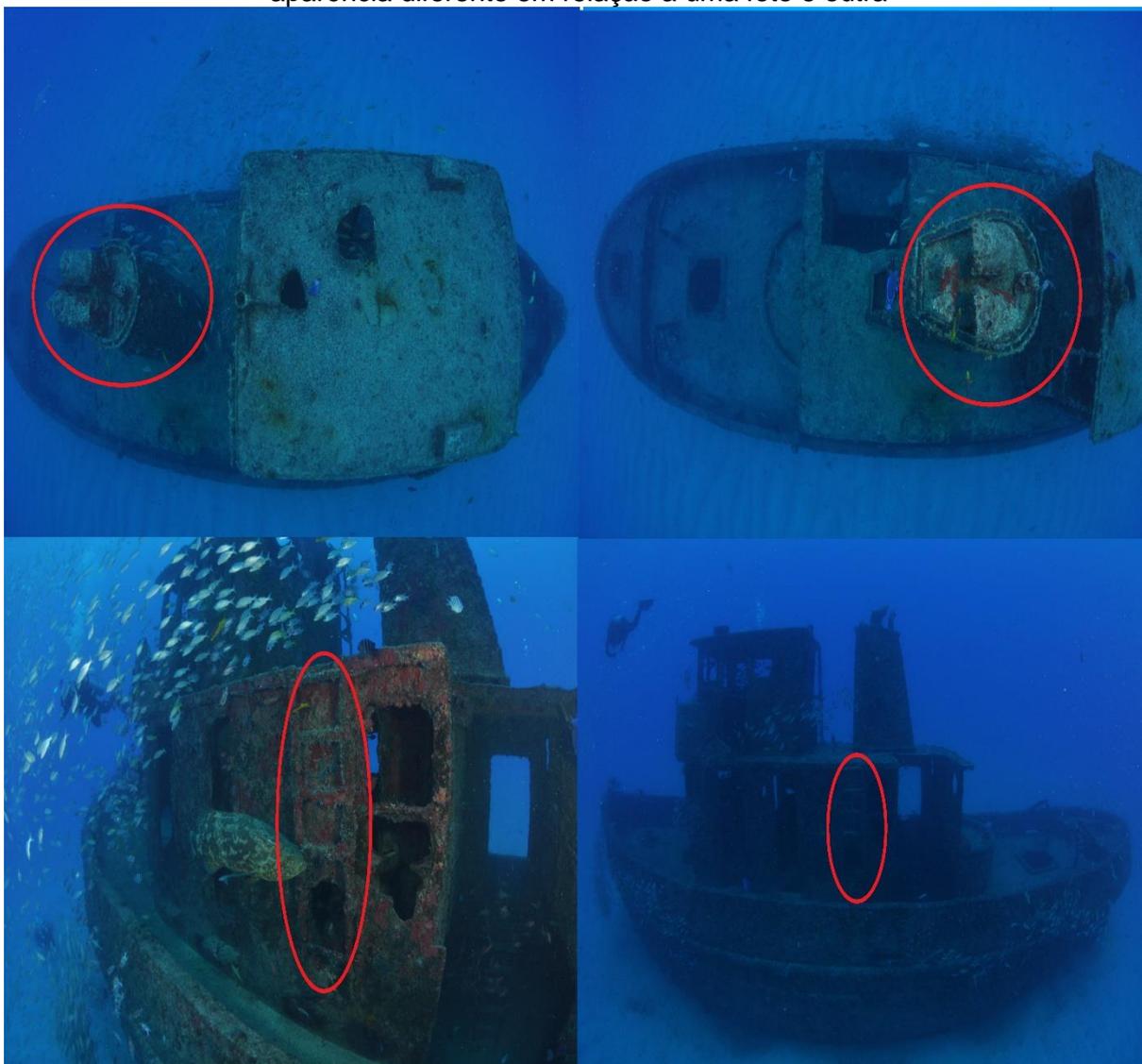
### 5.2.1 Imagens provenientes da câmara DSLR

No registro e acompanhamento das imagens adquiridas, foi verificado que até mesmo fotografias obtidas de uma mesma altura e tiradas sob as mesmas condições poderiam apresentar tonalidades e texturas totalmente diferentes, e que isto realmente representou um problema ao adquirir pares estereoscópicos, pois o *software* pode segregar pontos homólogos que deveriam compor o modelo.

Percebeu-se também que o afastamento causava uma perda de percepção e registro das cores. Embora os tons de azul sejam bastante proeminentes, mesmo com a iluminação artificial, com a proximidade, foi possível obter maiores detalhes, o que sugere que o levantamento subaquático, sob condições semelhantes de luminosidade, profundidade e estação do ano, seria mais efetivo se realizado com um número maior de fotografias, estas obtidas de maneira mais próxima do objeto, em um número suficiente para recobrir o navio inteiro, e se possível, combinada com outras imagens tiradas de outros ângulos e distâncias, para aumento do número de pontos esparsos, como o método *Structure From Motion* permite.

Na Figura 18, são demonstrados efeitos do meio aquático nas imagens: Nas fotografias superiores, mesmo sendo obtidas de uma mesma altura, o amarelo e o vermelho são mais proeminentes em uma fotografia do que em outra, e na fotografia inferior, percebe-se que textura e coloração vermelha podem ser visualizados, e com uma distância maior, não. Ou seja, pontos correspondentes entre as fotografias podem ser facilmente segregados pelo programa simplesmente por se apresentarem bem distintos.

Figura 18 – Diferenças entre fotografias que apresentam pontos semelhantes, mas aparência diferente em relação a uma foto e outra



Fonte: Rodrigo Henrique (2020).

### 5.2.2 Imagens provenientes da câmara SJ8 Plus

Sem iluminação artificial, apenas tons de azul apareceram. Como alguns autores sugeriram em estudos anteriores, o baixo contraste foi bastante evidente, como pode-se perceber na Figura 19. Em alguns testes preliminares, foi verificado que o software tendia a reconhecer erroneamente elementos da cena, por exemplo, partes do navio com o fundo do mar.

Figura 19 – Fotografia de baixo contraste



Fonte: A Autora (2020).

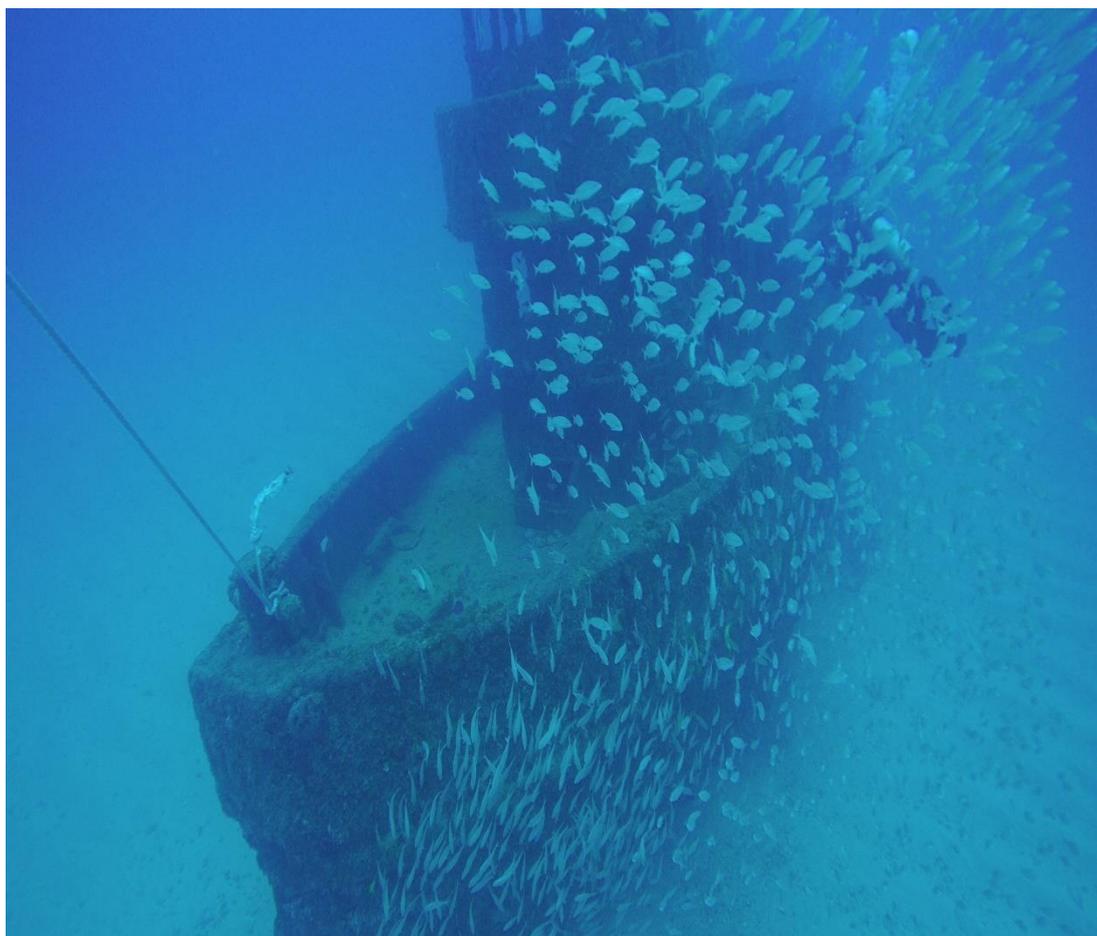
### 5.2.3 Elementos além do objeto: Vida marinha

Em um recife artificial que abriga diversas espécies, cardumes são presença constante. Entretanto, são elementos dificultadores na etapa de processamento. O programa tenta identificar pontos correspondentes entre as fotografias, mas se cardumes ocultarem parte do objeto, as feições serão perdidas, gerando má formação e/ou ausência de geometria da imagem (buracos). Outro erro comum gerado é a possibilidade de que o *software* possa reconhecer peixes, por exemplo, como parte

do navio, mas com a movimentação dos animais, o programa possa se confundir em relação ao que identificar, corresponder e segregar dentro dos pares estereoscópicos.

Em diversas fotografias de ambas as câmaras, como demonstrado nas Figuras 20 e 21, a vida marinha esteve presente, o que justificou a eliminação de diversas imagens na etapa do pré-processamento e, por vezes, a necessidade de obtenção de outras imagens.

Figura 20 – Vida marinha registrada através da câmara SJ8 Plus



Fonte: A Autora (2020).

Figura 21 – Vida marinha registrada através da câmara DSLR



Fonte: Rodrigo Henrique (2020).

### 5.3 FILTRO ACE

O filtro ACE demonstrou eficácia na redução de tons de azul. Pôde-se verificar que a coloração foi restaurada, evidenciando elementos em vermelho, verde, laranja e branco. As fotografias apresentaram colorações mais próximas ao real, principalmente nas fotografias de maior qualidade, provenientes da câmara DSLR (Figura 22).

Figura 22 - Foto original (a) e digitalmente processada (b) – Câmera DSLR com luz artificial



Fonte: A Autora (2020).

As fotografias obtidas pela câmara de ação também apresentaram melhora. Entretanto, por se tratar de um equipamento inferior no quesito qualidade, e não ter iluminação artificial, não apresentaram resultados tão bons quanto os da DSLR. Foi evidenciado que, em fotografias de baixo contraste, a aplicação de filtro não fez grande diferença, mas no geral, a coloração também se aproximou da realidade. A Figura 23 demonstra as alterações em uma foto obtida pela câmara de ação.

Figura 23- Foto original (a) e digitalmente processada (b) – Câmera de ação



Fonte: A Autora (2020).

#### 5.4 LEITURA DE PIXELS ANTES E DEPOIS DO PROCESSAMENTO

Foi selecionada uma amostra de 6 fotografias, 3 de cada câmara, para estudar o comportamento dos pixels. Nas fotografias da câmara DSLR, o valor mínimo do canal R foi 66, em comparação com 23, das fotografias originais.

Nas fotos da câmara de ação, o valor mínimo do canal R foi 144, contra 42 das fotografias originais. Foi evidenciado então que aumentar os níveis de vermelho é necessário para a equalização, mas não necessariamente aumenta a qualidade da imagem. Isto aconteceu com a câmara DSLR, mas muitas fotografias da câmara de ação proporcionaram alguns tons incorretos de rosa, o que talvez aumente o valor de R, mas não necessariamente tornem a imagem mais próxima à realidade. Os Quadros 6 e 7 apresentam os valores máximos e mínimos de cada canal, para cada câmara.

Quadro 6 - Valores máximos e mínimos dos pixels das fotografias da câmara DSLR digitalmente processadas

Canal	Fotos Processadas		Fotos Originais	
	Valores máximos	Valores mínimos	Valores máximos	Valores mínimos
<b>R</b>	66	49	23	14
<b>G</b>	186	176	122	113
<b>B</b>	197	189	223	210

Fonte: A Autora (2020).

Quadro 7 - Valores máximos e mínimos dos pixels das fotografias processadas da câmara de ação (SJ8)

Canal	Fotos processadas		Fotos originais	
	Valores máximos	Valores mínimos	Valores máximos	Valores mínimos
<b>R</b>	144	114	42	29
<b>G</b>	170	106	182	113
<b>B</b>	206	147	231	210

Fonte: A Autora (2020).

Observando o comportamento dos pixels das imagens quando aplicado o filtro ACE, percebeu-se que a melhora visual das imagens está ligada a alteração dos valores dentro dos canais, mas não apenas isso, pois foi visto que algumas fotos provenientes da câmara de ação eram de má qualidade (pouco contraste e nitidez), mesmo com filtro e com valores altos no canal vermelho. Ou seja, se a foto originalmente é de má qualidade, somente a alteração nos canais com aplicação de filtro não irá resolver este problema. No caso das câmaras DSLR, todas as fotografias melhoraram visualmente após a aplicação do filtro e da consequente alteração dos canais RGB.

Ao utilizar o algoritmo de Xiao (2014), criado para criar geometria 3D através do método SfM, pôde-se comparar a forma como os pares estereoscópicos eram reconhecidos. Mais “*matches*”, ou seja, pontos correspondentes, significa um melhor reconhecimento das feições, o que implica em uma formação mais eficaz da geometria da imagem. O Quadro 8 apresenta a diferença entre os *matches* obtidos ao

utilizar fotografias que formavam pares estereoscópicos entre si, com filtro e sem filtro, resultando, no total, em um acréscimo de reconhecimento de pontos homólogos.

Quadro 8 - Comparação entre pontos correspondentes

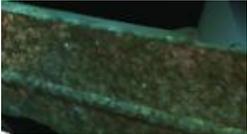
	<b>Com filtro</b>	<b>Sem filtro</b>
<b>Par 1-2</b>	79 Matches	22 Matches
<b>Par 2-3</b>	49 Matches	39 Matches
<b>Par 3-4</b>	46 Matches	76 Matches
<b>Par 4-5</b>	56 Matches	69 Matches

Fonte: A Autora (2020).

## 5.5 PROCESSAMENTO DE DADOS

As etapas posteriores envolveram o alinhamento, a construção da nuvem densa de pontos, que baseia-se em pontos com coordenadas X,Y,Z, criação de uma malha de polígonos (mesh) e texturização, que representa o produto final, com acabamento fotorrealista. O Quadro 9 demonstra os resultados de cada tipo de processamento.

Quadro 9 – Sequências e resultados

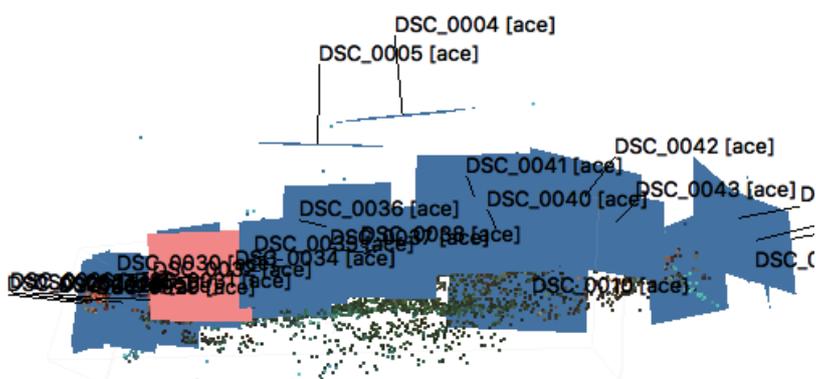
<b>Etapa</b>	<b>Produtos</b>	<b>Resultados</b>
<b>Alinhamento</b>	Nuvem esparsa de pontos Posicionamento das câmaras Geometria do levantamento	
<b>Referenciamento &amp; otimização</b>	Calibração (Orientação interna) Escala Produto ajustado	Valores reajustados para $c_x$ , $c_y$ , $k_1, k_2, k_3, k_4, p_1, p_2$ Redimensionamento a partir de informações métricas ou georreferenciadas
<b>Nuvem densa</b>	Pontos com coordenadas X, Y, Z Valor RGB dos pontos Normais de cada ponto	
<b>Malha de polígonos (Mesh)</b>	Superfície contínua Geração de superfície 3D	
<b>Texturização</b>	Modelo com acabamento fotorrealista	

Fonte: A Autora (2020).

Quando selecionadas pelo operador, estas fotografias a serem removidas ficam destacadas em vermelho, como é exemplificado no processo de alinhamento mostrado na Figura 24, e podem ser desabilitadas para não prejudicar o processamento.

Nas fotografias com a câmara de ação, não houve alterações significativas devido à qualidade da maioria das imagens. O software conseguiu reconhecer padrões em alguns pontos do navio, mas não em outros, e sem estabelecer relações entre as partes, o número de fotografias alinhadas não cresce.

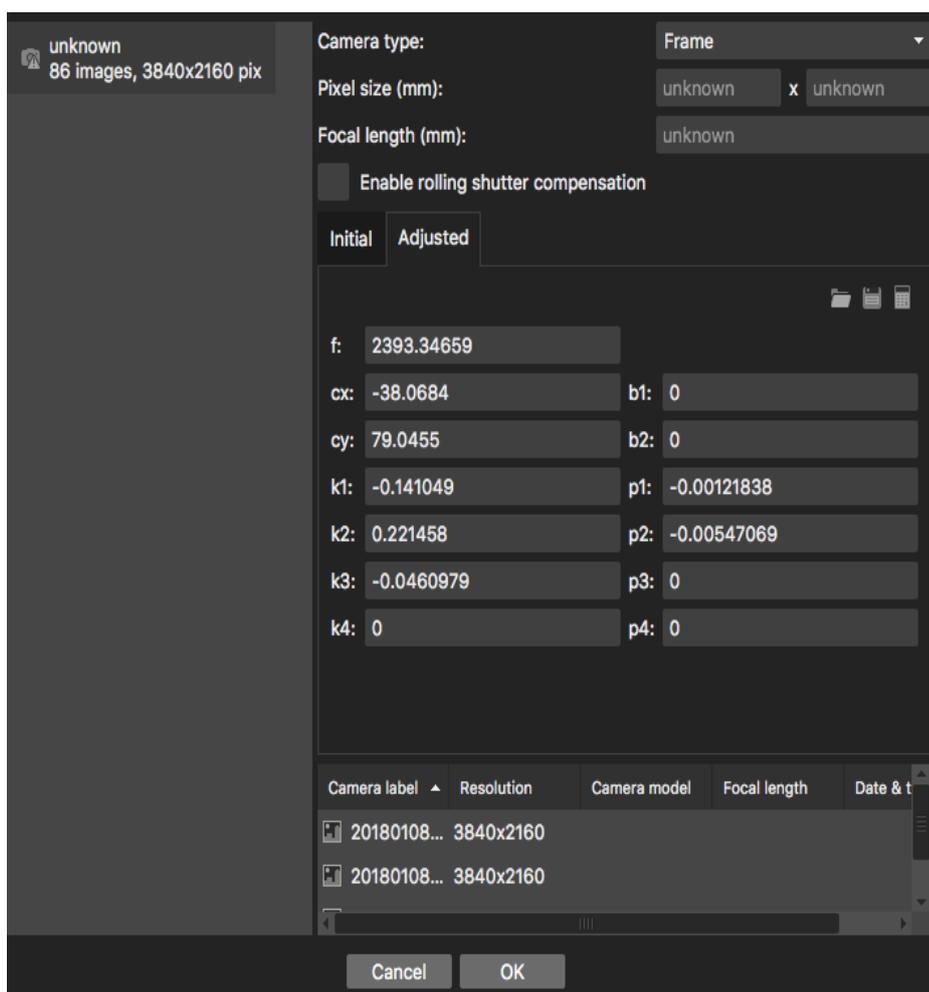
Figura 24 – Demonstração do processo de alinhamento



Fonte: A Autora (2020).

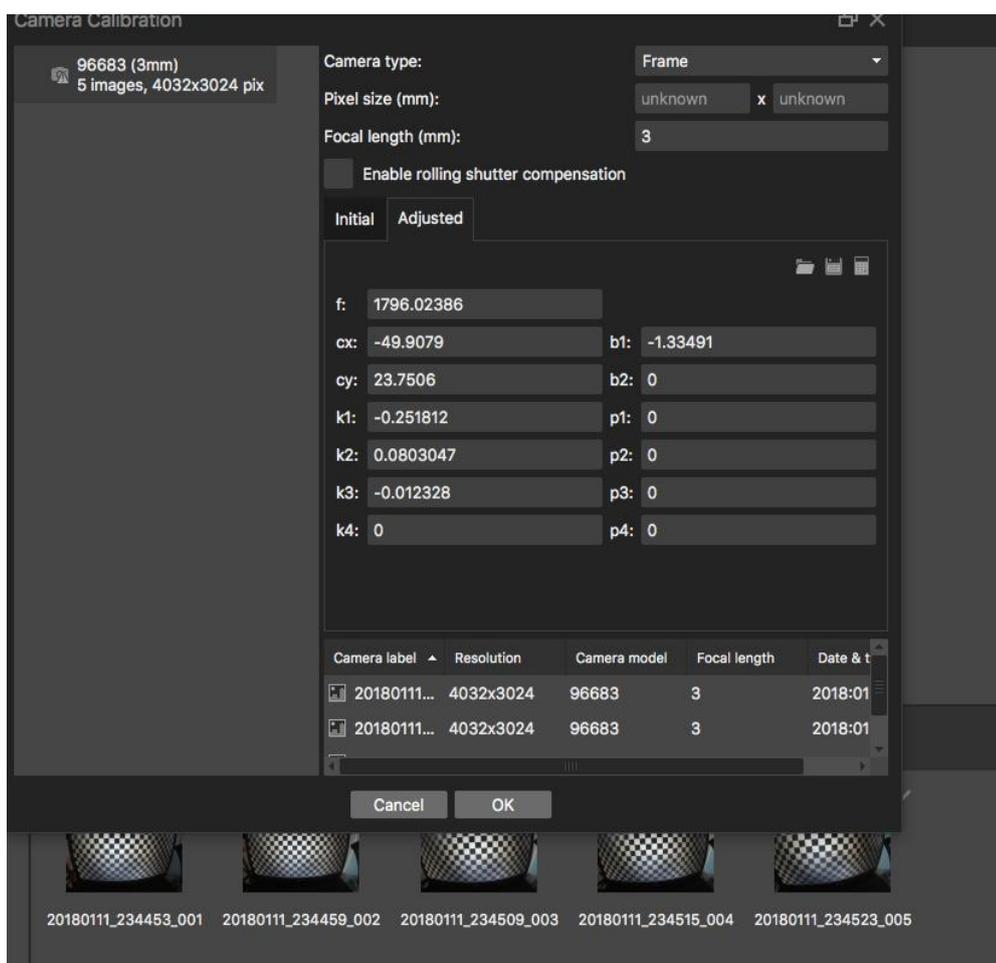
A etapa de referência neste trabalho consistiu em duas etapas: Calibração e otimização. O Agisoft calcula automaticamente estes dados, como é visto na Figura 25, e a partir de fotografias tiradas do chessboard fornecido pela própria companhia foi possível reajustar os valores (Figura 26).

Figura 25 - Valores calculados automaticamente pelo programa – Câmera de ação



Fonte: A Autora (2020).

Figura 26 - Valores calculados utilizando o chessboard – Câmera de ação



Fonte: A Autora (2020).

Câmaras não métricas geralmente não acompanham certificados de calibração. Entretanto, é possível que contenham algumas informações, tais como o tamanho dos pixels e a distância focal. Isto permite ao operador um processo de calibração parcial, onde é possível inserir as informações existentes e deixar o software reajustar outros valores a partir destas informações. Ao fazer estas etapas, percebeu-se que o processo de auto-calibração não seria preciso para nenhuma das câmaras, pois uma tinha distância focal de apenas 3mm, e a outra de 10mm, ambas distantes do valor pressuposto pelo software, 50mm. Sem a calibração, o programa pode criar distorções. A Figura 27 demonstra o processo de calibração realizado (Câmera DSLR).

Figura 27 - Calibração da câmara DSLR

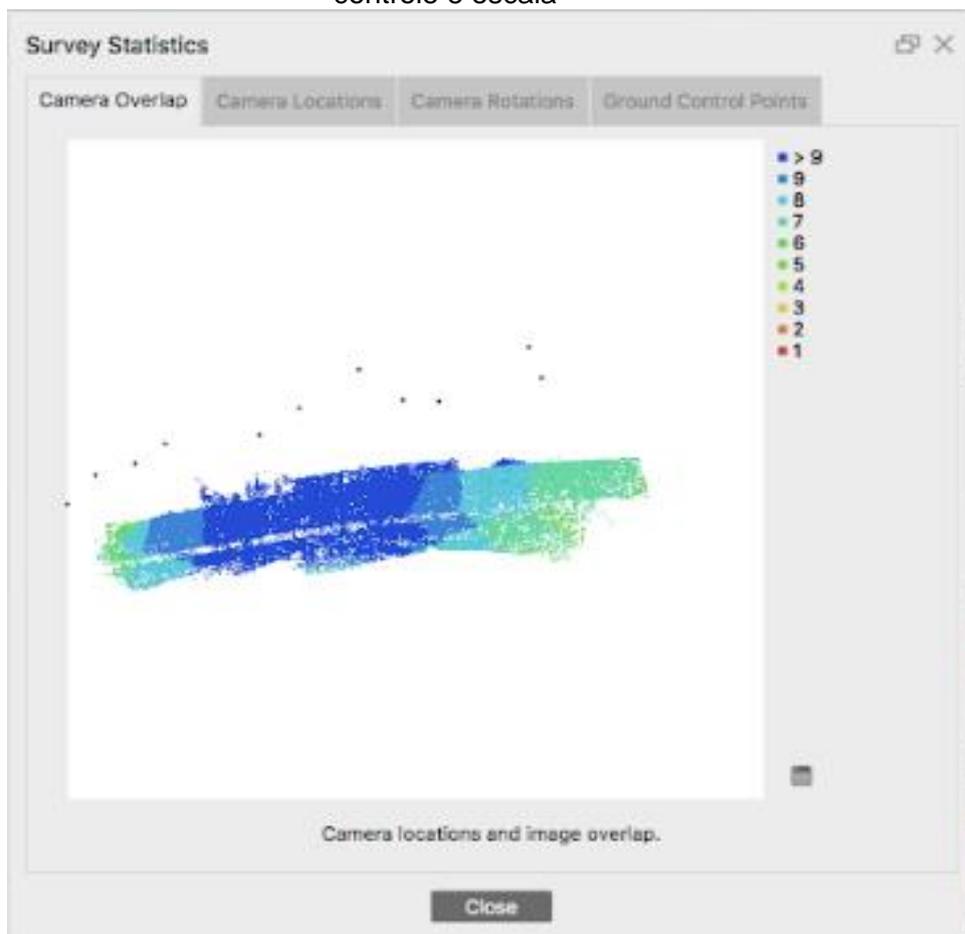
Fonte: A Autora (2020).

O referenciamento é uma etapa importante no processo pois diminui distorções e o modelo adquire informação espacial. Um de seus benefícios é poder gerar as estatísticas acerca da sobreposição fotográfica do levantamento, já com escala. Foi utilizada foi uma medida de distância fornecida por Carvalho (2011) e demarcada através de pontos de controle inseridos manualmente, nas extremidades. Ao realizar a calibração das câmaras e inserir a medida de comprimento, as informações foram otimizadas para que a nuvem se ajustasse.

Esta etapa foi beneficiada pela marcação manual de pontos de controle. Como visto anteriormente, existe a dificuldade de identificar pontos homólogos, mas demarcando pontos de forma manual, o programa considera automaticamente tais marcações como feições semelhantes. Neste tipo de operação, o operador necessita ser preciso e escolher pontos fotoidentificáveis, que devem ser fixos e estarem presentes em mais de uma fotografia. Desta forma, foi possível melhorar o alinhamento das fotografias. Como resultado, sem alinhamento, o número de fotografias alinhadas aumentou de 11 para 40, o que representa um excelente acréscimo na produção da nuvem de pontos esparsos.

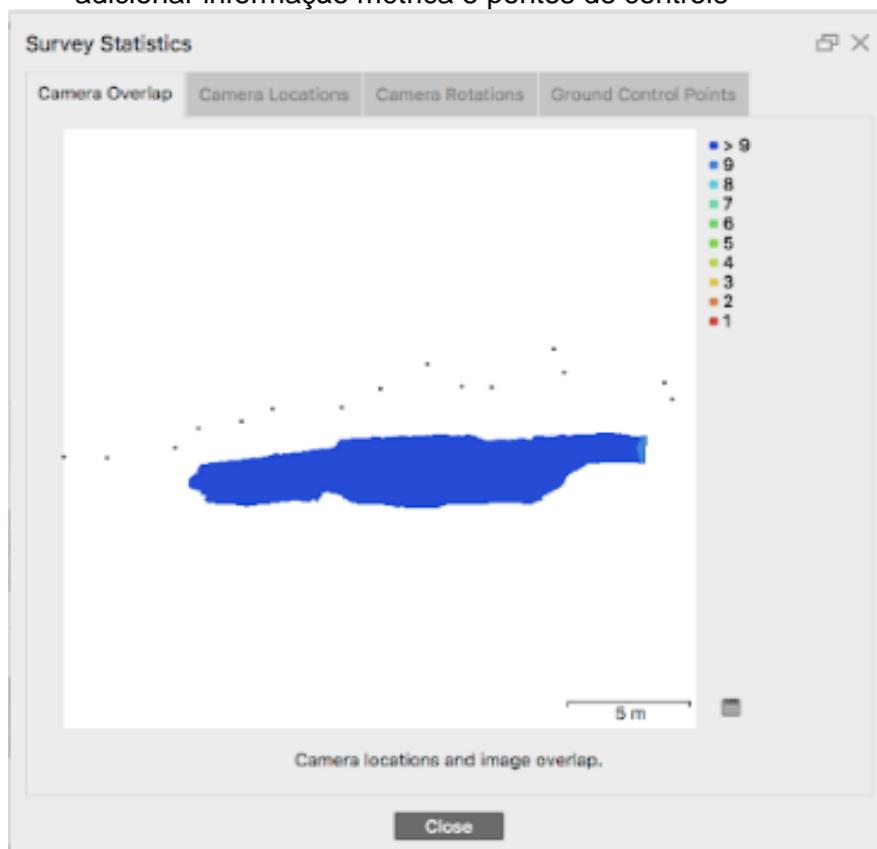
Foram geradas as estatísticas do levantamento. Sem demarcar manualmente pontos de controle e adicionar informação métrica (Figura 28), o número de fotografias sobrepostas foi menor do que efetuando o processo citado (Figura 29).

Figura 28- Representação do número de fotografias sobrepostas sem pontos de controle e escala



Fonte: A Autora (2020).

Figura 29-Representação do número de fotografias sobrepostas com escala após adicionar informação métrica e pontos de controle

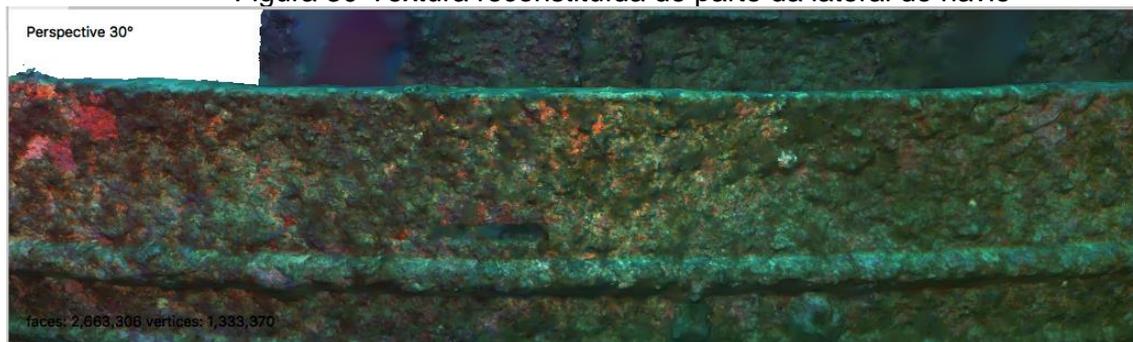


Fonte: A Autora (2020).

Embora o recobrimento mínimo tenha sido atingido, assim como o número de fotografias tenha sido, em teoria, suficiente, considerando a noção de recobrimento fotogramétrico, não foi possível tridimensionalizar o navio por inteiro. Parte da geometria foi perdida, por exemplo, o tubulão do hélice e parte superior do navio.

Mesmo sendo digitalmente processadas, algumas partes do navio se apresentaram mais foscas ou escuras, o que pode ter prejudicado o processamento, o que explica o fato do casco apresentar melhor forma do que as partes superiores, com boa textura (Figura 30).

Figura 30-Textura reconstituída de parte da lateral do navio



Fonte: A Autora (2020).

## 5.6 TRIDIMENSIONALIZAÇÃO

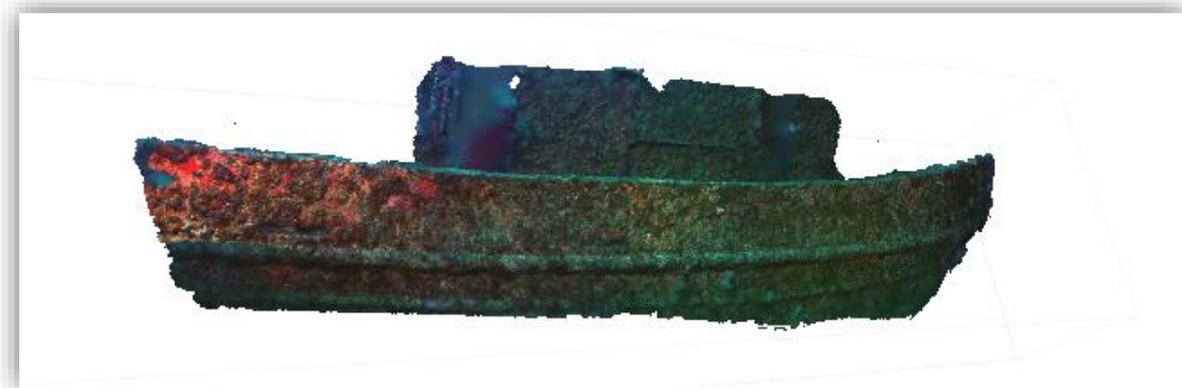
A tridimensionalização é o produto final do trabalho realizado. Mesmo com número menor de fotografias, o processo utilizando a câmara DSLR foi superior, resultando em formação mais completa da geometria. Os próximos tópicos abordam a comparação entre os resultados das duas câmaras utilizadas.

### 5.6.1 Câmara DSLR

Embora tecnicamente o número de fotografias seria suficiente para recobrimento total do navio, a produção de pontos foi baixa, em ambas as câmaras. Isto pode ocorrer pelo baixo número de fotografias ou pela qualidade inferior. Nos levantamentos subaquáticos, por vezes, até mesmo fotografias de um mesmo ponto podem sofrer alterações de iluminação e cor entre uma foto e outra. Poucas fotografias foram alinhadas na parte superior do navio, o que explica perda de geometria.

Não foi possível tridimensionalizar o navio por inteiro. Parte da geometria foi perdida, por exemplo, o tubulão do hélice e parte superior do navio. A Figura 31 mostra a tridimensionalização do navio a partir das fotografias da câmara DSLR, com geometria quase completa, poucos buracos nas laterais e má formação no topo.

Figura 31-Tridimensionalização do navio



Fonte: A Autora (2020).

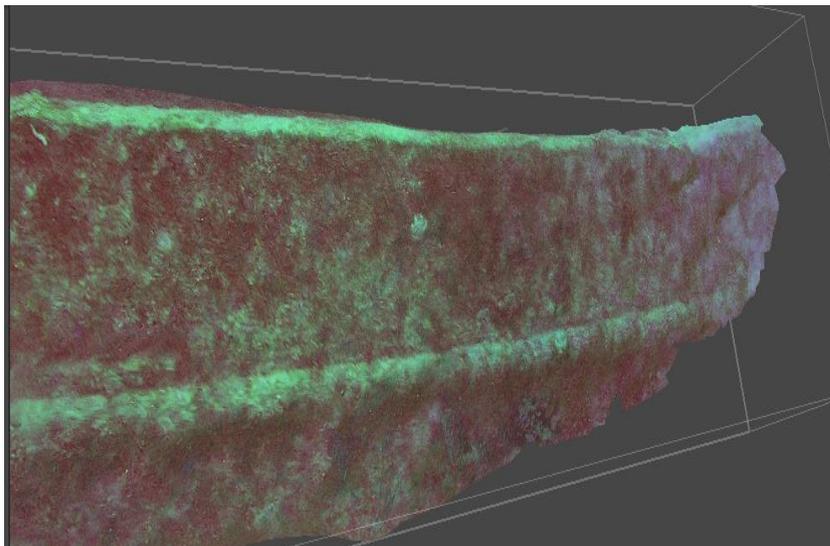
### 5.6.2 Câmara SJ8

Embora o número de fotografias tenha sido superior ao da câmara DSLR, a qualidade foi inferior. Apenas parte da geometria do casco foi formada, com coloração mais artificial. Não utilizou-se informações métricas nem otimização do processo devido ao fato de que por não apresentar formação completa, não seria possível adicionar a medida de uma extremidade a outra.

Boa parte da bibliografia existente sugeria que a tridimensionalização seria possível, mas não seria viável chegar a um consenso, pois era necessário observar, primeiramente, as características físicas do local. Grande parcela das fotografias não apresentava qualidade o suficiente para que o software fosse eficaz na distinção e correspondência de pontos, o que gerou, inclusive, uma confusão no alinhamento das fotografias.

Quanto as texturas, foram geradas de forma satisfatória, o que indica que possivelmente, sob certas condições, tais como com um número muito maior, iluminação artificial e/ou filtro vermelho, talvez mais pontos sejam produzidos e é possível que se consiga obter a geometria completa. A Figura 32 representa parte do casco do Servemar X.

Figura 32– Casco do Servemar X – Câmara de Ação



Fonte: A Autora (2020).

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O ambiente, a dificuldade operacional, a quantidade e a qualidade das fotografias foram fatores dificultadores para o trabalho. Foi demonstrado, na prática, que em profundidade, os tons de azul são bastante evidentes nas fotografias e podem prejudicar o processo de várias maneiras, tanto no reconhecimento dos pares estereoscópicos, que influenciam diretamente na formação de geometria tridimensional, quanto na proximidade com a realidade e diferenciação dos elementos da imagem. Além disso, viu-se que somente a equalização das fotografias e alteração dos canais RGB não são necessariamente suficientes para obter boas fotografias. Se a câmara é de boa qualidade, os resultados do processamento digital também serão, mas se não, tons irrealistas aparecerão, afastando a modelagem do real.

Um aspecto positivo foi a utilização do *Structure From Motion*, que conseguiu gerar boa parte da geometria com um processo de obtenção das fotografias bastante flexível. A possibilidade de obter fotos de vários ângulos e posições é ideal em ambiente submerso, pois é difícil obedecer parâmetros fixos de distância e recobrimento devido aos elementos naturais e falta de apoio técnico.

Quanto ao cumprimento das expectativas, na etapa de levantamento bibliográfico, ficou evidenciado pela pesquisa que o ideal não seria esperar um resultado semelhante no quesito qualidade ao de um levantamento terrestre ou aéreo, por exemplo, pois a luz e os tons afetam bastante o resultado final. Alguns autores investiram na vetorização para transformar o produto tridimensional bruto em um material mais apresentável, o que também é válido, mas não era a proposta deste trabalho em particular. Foi observado que na maioria dos trabalhos utilizando a fotogrametria subaquática, a metodologia envolveu um grupo considerável de pessoas, diferentemente deste estudo, onde o máximo que a autora contou foi com um mergulhador de apoio para obtenção de algumas fotografias com uma das câmaras em um único levantamento. Entretanto, considerando as dificuldades, percebeu-se que com uma maior estrutura é possível cumprir a proposta e atingir a geometria completa.

No quesito câmara DSLR *versus* a de ação, embora a câmara de ação tenha gerado mais imagens, existiu maior dificuldade no processamento, porém, é possível que, ao aumentar o número de fotografias, a tridimensionalização completa possa ser

obtida, e os detalhes sejam melhores ao usar ferramentas de apoio, como luz artificial e/ou filtro vermelho.

Sugere-se, para pesquisadores interessados em fazer estudos posteriores, que aumentem consideravelmente o número de fotografias, pois cumprir os requisitos mínimos para recobrimento fotogramétrico pode não ser suficiente devido à qualidade das imagens, afetada diretamente por elementos do ambiente marinho e pelo meio aquático em si que não sejam passíveis de controle.

## REFERÊNCIAS

- ABELSON, A. SHLESINGER, Y. Comparison of the development of coral and fish communities on rock-aggregated artificial reefs in Eilat, Red Sea. **ICES Journal of Marine Science**, v. 59, 2002.
- AGÊNCIA PORTUGUESA DO MEIO AMBIENTE. **Convenção OSPAR para a proteção do ambiente marinho do nordeste do Atlântico**. MARETEC, 2007.
- AGISOFT. **Agisoft Photoscan User Manual**. Agisoft LLC, 2018.
- AGIV, G.; KISSIYAR, O.; VANDERSTRAETE, T.; KROON, R.; VERBEKE, B. **Digital cameras for a photogrammetric production environment: A test of the geometric stability and accuracy**. Gent, 2008.
- AGRAFIOTIS, P. SKARLATOS, D. POUILLIS, C. FORBES, D. SKAMANTZARI, M. GEORGOPOULOS, A. **Underwater photogrammetry in very shallow waters: Main challenges and caustics effect removal**. ISPRS Archives, 2018.
- AL-HORANI, F.A. KHALAF, M. Developing artificial reefs for the mitigation of human-made coral reef damages in the gulf of Aqaba, Red Sea: Coral recruitment after 3.5 years of deployment. **Marine Biology Research**, 2013.
- AMBROSE, R.F. SWARBRICK, S.L. Comparison of fish assemblages on artificial and natural reefs off the coast of Southern California. **Bulletin of Marine Sciences**, 1989.
- AMMAR, M.S.A. Coral reef restoration and artificial reef management, future and economic. **The open environmental engineering journal**, 2009.
- ANELLI, M. JULITTA, T. FALLATI, L. GALLI, P. ROSSINI, M. COLOMBO, R. Towards new applications of underwater photogrammetry for investigating coral reef morphology and habitat complexity in the Myeik Archipelago, Myanmar. **Geocarto International**, 2017.
- ARAUJO, L.L. **Avaliação da dinâmica de áreas urbanas ocupadas por assentamentos irregulares utilizando visão estereoscópica por imagens anaglifo**. 2005. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.
- ASPRS. **The American society for Photogrammetry and Remote Sensing**. Peers, 1988.
- AWANGE, J.L. KIEMA, J.B.K. **Environmental Geoinformatics – Monitoring and management**. Springer, 2013.
- AZEVEDO, E.M.M. **Análise dos foraminíferos recentes da plataforma continental de Pernambuco, NE-Brasil**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

BARNETTE, M.C. **Potential impacts of artificial reef development on sea turtle conservation in Florida.** NOAA technical memorandum, 2017.

BRANDALIZE, M.C.B. **Topografia – Parte II.** 2000.

BEKTAS, K. ÇOLTEKIN, A. **A survey of stereoscopic visualization in mainstream geographic information systems.** 1ª conferência em mapas 3D, Dresden. 2009.

BELHASSEN, Y. ROUSSEAU, M. TYNIAKOV, J. SHASHAR, N. Evaluating the attractiveness and effectiveness of artificial coral reefs as a recreational ecosystem service. **Environmental Management**, 2017.

BERMAN, D. LEVY, D. AVIDAN, S. TREIBITZ, T. Underwater single image color restoration using haze-lines and a new quantitative dataset. **ArXiv**, 2018.

BIANCO, G. A new color correction method for underwater imaging. **ISPRS Archives**, 2015.

BORGES, R.O. FAZAN, A.J. SOBRAL, L.T. RIBEIRO, R.F. LANZA, D.S. Utilização de drones de pequeno porte como alternativa de baixo custo para caracterização topográfica da infraestrutura de transportes no Brasil. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 27., 2017, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: CBC, 2017.

BRASIL. **Constituição Federal de 1988.** 2016. Disponível em: [https://www.senado.leg.br/atividade/const/con1988/con1988\\_15.12.2016/art\\_20\\_.asp](https://www.senado.leg.br/atividade/const/con1988/con1988_15.12.2016/art_20_.asp). Acesso em: 1 fev. 2020.

\_\_\_\_\_. **Lei Nº 7.542.** 1986. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l7542.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l7542.htm). Acesso em: 1 fev. 2020.

\_\_\_\_\_. **Lei Nº 10.166.** 2000. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L10166.htm#art2](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L10166.htm#art2). Acesso em: 1 fev. 2020.

BUILL, F. NÚÑEZ, M.A. RODRÍGUEZ, J.J. **Fotogrametría arquetónica.** UPC, 2007.

BURT, J.A. USSEGLIO, P. BARTHOLOMEW, A. BAUMAN, A.G. **Are artificial reefs surrogates of natural habitats for corals and fish in Dubai, United Arab Emirates?** Coral Reefs, 2009.

CALIPPO, F.R.; CAMARGO, P.F.B.; RAMBELLI, G. Por uma arqueologia subaquática que vai além dos naufrágios: o caso do arquipélago de São Pedro e São Paulo. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 65, n. 2, 2013.

CALADO, L. SCHULER, C.A.B. **Uma imagem, duas cores, três dimensões:** registro e visualização de imagens georreferenciadas de fachadas e altares de igrejas de Olinda dos séculos XVI a XIX. II Seminário Ibero-Americano de Geografia Física. Universidade de Coimbra, 2010.

CAMPOS, S. **Understanding DPI and pixel dimensions**. 2007.

CARMO, J.S.A. DIAS, J. POLETTE, M. Recifes artificiais multifuncionais. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, 2010.

CARVALHO, M. **Naufrações do Brasil**. 2011.

CASABÁN, J.L. ROSSI, I.R. YAMAFUNE, K. CASTRO, F. **Underwater Photogrammetry and Applications: the gnaic shipwreck**. 2013. DOI: 10.13140, 2014.

CHAGAS, D.S. **Relação entre concentração de sólidos suspensos e turbidez da água medida com sensor de retroespalhamento óptico**. 2015. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2015.

CHITRADEVI, B. SRIMATHI, P. **An overview on image processing techniques**. 2014.

CIL. **1992 Bucharest convention for the protection of the Black Sea against pollution**. 2017.

COMISSÃO DO MAR NEGRO. **A comissão de proteção do mar negro contra a poluição**. 2009. Disponível em: [http://www.blacksea-commission.org/\\_convention.asp](http://www.blacksea-commission.org/_convention.asp). Acesso em: 5 ago. 2019.

CPRM. **Projeto batimetria**. 2013.

DAMME, T.V. **Computer vision photogrammetry for underwater archaeological site recording in a low – visibility environment**. Piano di Sorento, 2015.

DEVI, S. Stereoscopic vision, stereoscope, selection of stereo pair and its orientation. **International Journal of Science and Research**, v. 3, n. 9, 2014.

DINIZ, E.A. **Avaliação de produtos aerofotogramétricos alternativos com câmaras digitais não métricas de pequeno formato em voo apoiado**. 2016. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

DRAP, P. Underwater photogrammetry for archaeology. **Special applications for photogrammetry**, 2012.

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**, 2015.

DULLEY, R.D. Noção de natureza, ambiente, meio ambiente, recursos ambientais e recursos naturais. **Revista Agricultura**, v. 51, n. 2, p.15-26, 2004.

ESTADÃO. **Projeto pioneiro surgiu há 10 anos, no Estado do Rio**. 2013.

FAO. **Practical guidelines for the use of artificial reefs in the mediterranean and the black sea.** Roma, 2015.

FARIA, G. G. M.; GHIRARDELLO, N.; SPISSO, B. **Patrimônio histórico: como e por que preservar.** (Manual do CREA, 2008). São Paulo: CREA, 2008. 31f. Disponível em: [http://www.creasp.org.br/arquivos/publicacoes/patrimonio\\_historico.pdf](http://www.creasp.org.br/arquivos/publicacoes/patrimonio_historico.pdf). Acesso em: 15 out. 2017.

FERNANDES, S. D. F. F. **Levantamento e diagnóstico estrutural com recuso a fotogrametria.** 2016. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2016.

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**, 2015.

FOSTER, S.; HALBSTEIN, D. **Integrating 3D modelling, photogrammetry and design.** Nova York: Springer, 2014.

FUNARI, P.P.A; PENEGRINI, S.C.A. **Patrimônio histórico e cultural.** 3. ed. Rio de Janeiro: Jahar, 2006.

GALAMBA, J. **Procedimentos de normas para gestão de um mergulho sustentável fundamentado em educação ambiental.** 2008. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

GÁLDRAN, A. PICON, A. PARDO, D. GILA-ALVAREZ, A. Automatic red-channel underwater image restoration. **Journal of visual communication and image representation**, 2014.

GARRISON, T. **Fundamentos de oceanografia.** 4. ed. 2010.

GETREUER, P. Automatic color enhancement (ACE) and its fast implementation. **Image processing**, p. 266-277, 2012.

GHANI, A.S.A. ISA, N.A.M. **Underwate image contrast enhacement through multilevel histogram modification based on color channel percentages.** 2014.

GONZALES, R.C. WOODS, R.E. **Digital image processing.** Pearson, 2007.

GOVERNO FEDERAL DO BRASIL. **Estudo sobre a indústria brasileira e europeia de veículos aéreos não tripulados.** 2017.

GUSMÃO, D.M. Tendências contemporâneas da arqueologia pública x patrimônio cultural subaquático. **Revista de Arqueologia Pública**, v. 9, n. 2, p. 72-86, 2015.

GREGÓRIO, M. N. **Evolução da linha de costa e caracterização da plataforma continental interna adjacente à cidade do Recife – PE.** 2009. Tese (Doutorado em Oceanografia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009. 173p.

HARRIS, L. E. Artificial reefs for ecosystem restoration and coastal erosion protection with aquaculture and recreational amenities. **Reef Journal**, v. 1, n. 1, 2009.

HAZIN, F. H. V. **Biomassa fitoplantônica, zooplantônica, macrozooplanton, avaliação espacial e temporal do ictioplanton, estrutura da comunidade de larvas e de peixes e distribuição e abundância do ictioneuston**. Programa Revizee – Score Nordeste, 2009.

HIGGINS, E. SCHEILBLING, R.E. DESILETS, K.M. METAXAS, A. **Benthic community succession on artificial and natural coral reefs in the northern gulf of Aqaba, Red Sea**. PLOS ONE, 2019.

IBAMA. **Instrução normativa Nº 22**. 2009.

IMO. **Convention on the prevention of marine pollution by dumping of wastes and other matter**. 2006.

IQBAL, K. SALAM, R.A. OSMAN, A. TALLIB, A.Z. Underwater image enhancement using an integrated colour model. **International Journal of Computer Science**, 2007.

JUNQUEIRA, C.S. **Imagens anaglifo para observação em 3D das características arquitetônicas de bens patrimoniais georreferenciados**. 2010. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

KELBER, A. VOROBYEV, M. OSORIO, D. Animal color vision – behavioural and physiological concepts. **Biological Reviews**, 2003

KRASZEWSKI, B. Calibration of digital SLR Nikon D3X for the use in digital photogrammetry projects. **Geoinformation Issues**, V. 3, N.1, 2011.

KUBIK, D.L. Development of photogrammetric methods of stress analysis and quality control. **ArXiv**, 2003.

KUBER, M.P.S. DIXIT, M. A review on modified image enhancement applications. **International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition**, v. 7, n. 5, 2014.

KULTYS, M. Visual alpha-beta-gamma: Rudiments of visual design for data explorers. **Parsons Journal for Information Mapping**, 2013.

LI, W. BERTIN, S. FRIEDRICH, H. Combining structure from motion and close-range stereo photogrammetry to obtain scaled gravel bar DEMs. **International Journal of Remote Sensing**, 2018.

LIAROKAPIS, F. KOURIL, P. AGRAFIOTIS, P. DEMESTICHA, S. CHMELIK, J. SKARLATOS, D. **3D Modelling and mapping for virtual exploration of underwater archaeology assets**. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, V. 42, p. 425-431, 2017.

LINDER, W. **Digital photogrammetry** – Theory and applications. Düsseldorf: Springer: 2013.

MALARD, M.A. SANTOS FILHO, J.C. BALTAZAR, A.P. PERONTI, R. LAGES, W. **Princípios teóricos da estereoscopia**. Belo Horizonte: UFMG, 2008.

MATHUIY, F.H. **Patrimônio cultural subaquático**. Brasília, 2012. Disponível em: [http://www.senado.leg.br/comissoes/CE/AP/AP20121122\\_FlavioHaruoMathuiy.pdf](http://www.senado.leg.br/comissoes/CE/AP/AP20121122_FlavioHaruoMathuiy.pdf). Acesso em: 15 ago. 2018.

MAYER, H. **Issues for image matching in structure from motion**. ISPRS Archives, 2008.

MCMILLAN, P. **Fundamentals of image processing**. Melbourne, 2018.

MERLO, F.; KONRAD, G.V.R. Documento, história e memória: A importância da preservação do patrimônio documental para o acesso à informação. **Uel**, Londrina, v. 20, n.1. 2015.

MICHELETTI, N. CHANDLER, J.H. LANE, S.N. Structure from motion (SfM) photogrammetry. **Geomorphological techniques**, 2015.

MOREL, J.M. PETRO, A.B. SBERT, C. Screened poisson equation for image contrast enhancement. **Image processing**, 2014.

MUTHUSELVI, S. PRABHU, P. Digital image processing techniques – a survey. **Golden Research Thoughts**, v. 5, n. 11, 2016.

NG, CSL. TOH, T.C. CHOU, L.M. Artificial reefs as a reef restoration strategy in sediment-affected environments: Insights from long-term monitoring. **Aquatic conservation**, v. 27, n. 5, 2017.

NYIMBILI, P.H. SEKER, D.Z. DEMIREL, H. ERDEN, T. **Structure from Motion (SfM) – Approaches and applications**. International Scientific Conference on Applied sciences, 2016.

OLIVEIRA, M.M. **A documentação como ferramenta de preservação da memória**. IPHAN, Programa Monumenta, 2008.

OLIVEIRA, T.R.S. CORREIA, K.V. ARRUDA, G.B. MELO, M.C.S.S. BARCELLOS, R.L. Estudo comparativo do fenômeno da erosão marinha e seus impactos na praia de Boa Viagem, Recife-PE. **Estudos Geológicos**, v. 25, 2015.

OSPAR. **Ospar Convention**. 2015.

PHILPOT, W.D. **Remote Sensing Fundamentals**. 2012.

PIZER, S.M. AMBURN, J.D. CROMARTIE, A.Y. GESELOWITZ, A. GREER, T. TER HAAR ROMENY, B.M. ZIMMERMAN, J.B. ZUIDERVELD, K. **Adaptive histogram**

**equalization and its variations.** Computer vision, graphics and image processing, p.355-368, 1987

PRATT, J.R. Artificial habitats and ecosystem restoration: Managing for the future. **Bulletin of Marine Science**, 1994.

PREOSCK, R.E. **Otimização da restituição fotogramétrica digital urbana: relação escala da fotogrametria e a resolução geométrica da imagem.** 2006. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

RAMBELLI, G. Patrimônio cultural subaquático da humanidade: Um patrimônio sem fronteiras. **Diálogos**, v. 10, n. 3, p. 19-32, 2006.

\_\_\_\_\_. Entre o Uso social e o abuso comercial: As percepções do patrimônio cultural subaquático no Brasil. **História**, São Paulo, v. 27, n. 2, 2008.

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.** Sidney, 2016.

RENDLE, E.J. RODWELL, L.D. Artificial surf reefs: A preliminary assessment of the potential to enhance a coastal economy. **Marine Policy**, v. 45, 2014.

RIBAS, C.A. **Caracterização e estudo comportamental da ictiofauna associada ao naufrágio Marte – Serrambi – PE.** 2013. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

RIGGIO, S. BALADAMENTI, F. D'ANNA, G. **Artificial reefs in Sicily: an overview.** 2000.

ROCHE, R.C. HARVEY, C. V. HARVEY, J.J. KAVANAGH, A.P. MC DONALD, M. STEIN-ROSTANG, V.R. TURNER, J.R. Recreational diving impacts on coral reefs and the adoption of environmentally responsible practices within the scuba diving industry. **Environmental management**, v. 58, n. 1, 2016.

SANTOS, A.A. BARROS, G.B. ANDRADE, M.R. SALES, P.A.G. A divulgação deficiente do turismo de naufrágio da cidade do Recife, Pernambuco. **Revista Nordestina de Ecoturismo**, v. 3, n. 2, 2010.

SANTOS, D.H.C. **Estudo socioambiental dos naufrágios da plataforma continental de Pernambuco-Brasil:** contribuição para a formulação de políticas ambientais e manejo de recifes artificiais marinhos na costa do Estado de Pernambuco. 2006. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

SARTORI, M.V. **Uma interpretação da convenção UNESCO de 2001 sobre a proteção do patrimônio cultural subaquático:** reflexões acerca do direito internacional e do direito brasileiro. 2015. Tese (Doutorado) - Universidade Católica de Santos, Santos, 2015.

- SCHENK, T. **Introduction to photogrammetry**. Ohio, 2005.
- SCURI, A.E. **Fundamentos da imagem digital**. Rio de Janeiro, 1999.
- SEEMAN, L. SALAMA, M.S. **Underwater photogrammetric recording of site of Anfeh, Lebanon**. 3D recording and interpretation for maritime archaeology. Coastal Research Library, v. 31, 2019.
- SEKER, D.Z. DURAN, Z. **Terrestrial and numerical photogrammetry**. 2015.
- SENADO DO BRASIL. **Projeto de lei da câmara Nº45**. Brasília, 2008.
- \_\_\_\_\_. **Projeto que protege patrimônio cultural sob águas marítimas divide opiniões**. Brasília, 2012.
- SHALABY, A. ELMOGY, M. EL-FETOUH, A.A. Algorithms and applications of Structure from Motion (SfM): A survey. **International Journal of Computer and Information Technology**, v. 6, 2017.
- SILVA, B.Q. SCHULER, C.A.B. **Fotogrametria aplicada à análise de homologia harmônica de frontispícios de templo com valor histórico e artístico**. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2015.
- SILVA, D.C. Evolução da fotogrametria no Brasil. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 3, n. 2, p. 81-96, 2015.
- SINGH, C.D. **Structure From Motion**. Computer Vision, 2019.
- SISCOUITO, R.A. SZENBERG, F. TORI, R. RAPOSO, A.B. CELES, W. GATTASS, M. **Estereoscopia**. 2004.
- SLÁDKOVÁ, D. KAPICA, R. MIKULENKA, V. The potential of photogrammetry for object monitoring and undermined areas. **Acta Montanistica Slovaca**, 2011.
- SOLOMON, C. BRECKON, T. **Fundamentals of digital image processing**. 2011.
- STOJAKOVIC, V. **Terrestrial Photogrammetry and Application**. Series: Architecture and Civil Engineering, Facta Universitatis, v.6, 2008.
- TEAGUE, J. SCOTT, T. Underwater photogrammetry and 3D reconstruction of submerged objects in shallow environments by ROV and underwater GPS. **Journal of Marine Research and Technology** 1:005, 2017.
- TEMBA, P. **Fundamentos da fotogrametria**. Belo Horizonte: UFMG, 2000.
- TONDELO, P.G. BARTH, F. **Análise das manifestações patológicas em fachadas por meio de inspeção com VANT**. PARC, 2019.

TORRES, R. YAMAFUNE, K. CASTRO, F. FERREIRA, S. Mapeando em profundidade: A integração de técnicas digitais para a pesquisa arqueológica de sítios de naufrágios históricos. **Revista Vestígios**, v. 11, p. 105-134, 2017.

TOUTIN, T. Qualitative aspects of chromo-stereoscopy for depth perception. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 1997.

TYAGI, V. **Understanding digital image processing**. Taylor & Francis, 2018.

UNEP. **London convention and protocol** - Guidelines for the placement of artificial reefs. 2009.

UNESCO. **Convenção sobre a proteção do patrimônio cultural subaquático**. Paris, 2001. Disponível em: [http://www.unesco.org/culture/por/heritage/laws/conv\\_patsubaqu\\_portu.pdf](http://www.unesco.org/culture/por/heritage/laws/conv_patsubaqu_portu.pdf). Acesso em: 20 ago. 2018.

VICE. **Um cemitério de navios repousa nas profundezas do Brasil**. Disponível em: [https://motherboard.vice.com/pt\\_br/article/gybj5b/um-cemiterio-de-navios-repousa-nas-profundezas-do-brasil](https://motherboard.vice.com/pt_br/article/gybj5b/um-cemiterio-de-navios-repousa-nas-profundezas-do-brasil). 2017. Acesso em: 1 nov. 2018.

XIAO, J. A Structure from motion system for education. **Princeton Vision and Robotics**, 2014.

ZAINAL, A.S.Z. MOHAMED, B. A review of scuba diving impacts and implication for coral reefs conservation and tourism management. **SHS Web of conferences**, v. 12, 2014.

ZUIDERVELD, K. **Constrast limited adaptative histogram equalization**. Cambridge, 1994.