



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

SARA CAVALCANTI WANDERLEY DE SIQUEIRA

**RPAS COMO FERRAMENTA NA ANÁLISE DE VARIAÇÕES
GEOMORFOLÓGICAS E DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DE AVES
MARINHAS EM ILHAS RECIFAIS: REBIO Atol das Rocas**

Recife
2023

SARA CAVALCANTI WANDERLEY DE SIQUEIRA

**RPAS COMO FERRAMENTA NA ANÁLISE DE VARIAÇÕES
GEOMORFOLÓGICAS E DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DE AVES
MARINHAS EM ILHAS RECIFAIS: REBIO Atol das Rocas**

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

Área de concentração: Oceanografia Abiótica.

Orientadora: Profa. Dra. Mirella Borba Santos Ferreira Costa.

Recife

2023

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

S618r

Siqueira, Sara Cavalcanti Wanderley de.

RPAS como ferramenta na análise de variações geomorfológicas e distribuição espaço-temporal de aves marinhas em ilhas recifais: REBIO Atol das Rocas / Sara Cavalcanti Wanderley de Siqueira. – 2023.

100 f.: il., fig. e tab.

Orientadora: Profa. Dra. Mirella Borba Santos Ferreira Costa.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, 2023.

Inclui referências e Anexo.

1. Oceanografia. 2. Linha de costa. 3. Drone. 4. Morfodinâmica. 5. Depressão central. 6. SIG. 7. Conservação marinha. I. Costa, Mirella Borba Santos Ferreira (Orientadora). II. Título.

UFPE

551.46 CDD (22. ed.)

BCTG/2024-78

SARA CAVALCANTI WANDERLEY DE SIQUEIRA

**RPAS COMO FERRAMENTA NA ANÁLISE DE VARIAÇÕES
GEOMORFOLÓGICAS E DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DE AVES
MARINHAS EM ILHAS RECIFAIS: REBIO Atol das Rocas**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Oceanografia. Área de concentração: Oceanografia Abiótica.

Aprovada em: 15/09/2023.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Mirella Borba Santos Ferreira Costa (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Tereza Cristina Medeiros de Araújo (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Davis Pereira de Paula (Examinador Externo)
Universidade Estadual do Ceará

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Mirella Costa, pelas grandes contribuições, incentivo, ensinamentos, confiança, oportunidades e ótima convivência durante todo esse período. Serei sempre grata;

Ao professor Rodrigo Mikosz (LACOST) pelas contribuições, incentivo, parceria e empréstimo de equipamentos para a coleta de dados;

Ao Tiago Holanda, pela paciência, momentos de convivência, por ser sempre solícito e pelo suporte com o drone e processamento de dados;

À chefe da REBIO Atol das Rocas, Zelinha, pelo apoio, oportunidade e por seu grande esforço, cuidado e dedicação em prol da conservação desse ambiente tão importante para a biodiversidade marinha. Estendo aqui os agradecimentos ao ICMBIO, MMA, Fundação SOS Mata Atlântica e Fundação Grupo Boticário de Proteção à Natureza;

Ao Jarian e Barão, por todo o apoio, convivência e parceria durante as campanhas para coleta de dados. Estendo aqui os agradecimentos ao Carlão, Rafa e Herlen pela colaboração;

Ao Capitão Zeca e toda a tripulação do Borandá, por garantirem idas e vindas seguras e agradáveis durante as expedições à REBIO;

A todas as professoras e professores do DOCEAN, pelos ensinamentos e contribuição na minha formação acadêmica. Um agradecimento especial ao professor Pedro Pereira pelas excelentes aulas sobre Erosão Costeira na graduação, que contribuíram para despertar meu interesse na oceanografia geológica;

Ao Laboratório de Oceanografia Geológica (LABOGEO), por contribuir para a viabilidade técnica do projeto;

Aos membros da banca, por aceitarem colaborar com o aprimoramento da pesquisa;

À CAPES, pela concessão da bolsa de mestrado;

Às amigas e aos amigos, por permitirem momentos de descontração fundamentais em um período de grande autocobrança que exigiu bastante esforço e dedicação, pela companhia, pelo compartilhamento das dificuldades e pelas diversas dúvidas tiradas durante o mestrado.

Por fim, mas não menos importante, à minha família, por tudo, principalmente por servirem de exemplo, pela educação e pelo suporte de sempre.

RESUMO

As ilhas recifais são consideradas um dos ambientes mais vulneráveis aos efeitos das mudanças climáticas, especialmente com relação ao risco de processos erosivos e eventos de inundação. Do ponto de vista ecológico, essas regiões são relevantes para a manutenção da biodiversidade marinha, sendo fundamentais para a reprodução de espécies que nidificam em ambientes insulares, como as aves *Anous stolidus* e *Onychoprion fuscatus*. Por outro lado, estudos em áreas remotas possuem diversos obstáculos com relação às metodologias tradicionalmente empregadas. Este trabalho teve como objetivo utilizar um Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada (RPAS) para: (i) compreender as variações geomorfológicas atuantes em duas ilhas recifais inseridas no Atol das Rocas (Ilha do Farol e Ilha do Cemitério), detectando locais de erosão/acreção; (ii) analisar a distribuição espaço-temporal e densidade do ninhal de aves marinhas na Ilha do Farol; (iii) contribuir na inovação das técnicas de monitoramento desta Reserva Biológica. Foram utilizadas imagens capturadas durante quatro expedições (2020 a 2022) para gerar ortomosaicos e Modelos Digitais de Terreno. Técnicas de geoprocessamento foram aplicadas e parâmetros adicionais como ondas, correntes e vegetação característicos da região também foram discutidos. Com relação aos aspectos geomorfológicos, as extremidades das ilhas constituem os locais de maior dinâmica sedimentar. O predomínio de erosão em dezembro e de acreção em maio, bem como a migração das extremidades, estão associados a ondulações energéticas (*swell* de norte). As características da depressão central e suas variações constituem um fator relevante a ser considerado com relação à estabilidade geomorfológica da Ilha do Farol e destacam a necessidade do monitoramento desta feição nesta e em outras ilhas recifais. Com relação aos aspectos ecológicos associados à distribuição espaço-temporal de aves marinhas, houve uma preferência das aves por nidificar sobre vegetação densa, composta por *Cyperus* sp. e *Portulaca oleracea* distribuídas nas regiões mais centrais da ilha. Apesar dessas áreas terem apresentado uma estabilidade geomorfológica a curto prazo, elas possuem baixa elevação e estão situadas nas imediações de uma depressão central dinâmica, contribuindo para a vulnerabilidade dos ninhos a eventos erosivos e de inundação associados a esta feição, sobretudo a médio e longo prazo. Com relação à variação na quantidade de aves, o maior número foi registrado em maio/2022, totalizando uma população estimada de 115.360 aves (*O. fuscatus* e *A. stolidus*) na Ilha do Farol. Em comparação ao mesmo mês no ano anterior (N=9.939), houve diferença estatisticamente significativa, sugerindo a inexistência de uma sazonalidade anual determinante na nidificação. Os resultados ressaltam o potencial do RPAS como ferramenta eficiente tanto para o estudo das variações

geomorfológicas em ambientes insulares remotos, como para a análise da distribuição espaço-temporal dos ninhos de aves marinhas. O armazenamento das imagens aéreas capturadas permite a criação de um banco de dados geoespaciais que pode ser utilizado como referência para comparações futuras. Nesse sentido, o trabalho destaca a importância da implantação/manutenção de programas de monitoramento englobando aspectos geomorfológicos em ilhas recifais e aspectos ecológicos associados à nidificação de aves marinhas, especialmente considerando o atual contexto das mudanças climáticas.

Palavras-chave: linha de costa; drone; morfodinâmica; depressão central; SIG; conservação marinha.

ABSTRACT

Reef islands are considered one of the most vulnerable environments to the effects of climate change, especially with regard to the risk of erosion processes and flooding events. From an ecological point of view, these regions are relevant for the maintenance of marine biodiversity, being fundamental for the reproduction of species that nest in island environments, such as the birds *Anous stolidus* and *Onychoprion fuscatus*. On the other hand, studies in remote areas have several obstacles in relation to the traditionally employed methodologies. This work aimed to use a Remotely Piloted Aircraft System (RPAS) to: (i) understand the geomorphological variations operating in two reef islands inserted in Atol das Rocas, detecting erosion/accretion sites; (ii) analyze the space-time distribution and nesting density of seabirds on Ilha do Farol; (iii) contribute to the innovation of monitoring techniques for this Biological Reserve. Images captured during four expeditions (2020 to 2022) were used to generate orthomosaics and Digital Terrain Models. Geoprocessing techniques were applied and additional parameters such as waves, currents and vegetation characteristic of the region were also discussed. With regard to geomorphological aspects, the extremities of the islands are the places with the greatest sedimentary dynamics. The predominance of erosion in December and accretion in May, as well as the migration of the extremities, are associated with energetic swells (northern swell). The characteristics of the central depression and its variations constitute a relevant factor to be considered in relation to the geomorphological stability of Ilha do Farol and highlight the need for monitoring this feature in this and other reef islands. Regarding the ecological aspects associated with the space-time distribution of seabirds, there was a preference for birds to nest on dense vegetation, composed of *Cyperus* sp. and *Portulaca oleracea* distributed in the most central regions of the island. Although these areas have shown geomorphological stability in the short term, they have low elevation and are located in the vicinity of a dynamic central depression, contributing to the vulnerability of nests to erosion and flooding events associated with this feature, especially in the medium and long-term. Regarding the variation in the number of birds, the highest number was recorded in May/2022, totaling an estimated population of 115,360 birds (*O. fuscatus* and *A. stolidus*) on Farol Island. Compared to the same month in the previous year (N=9,939), there was a statistically significant difference, suggesting the lack of an annual seasonality that determines nesting. The results underscore the potential of RPAS as an efficient tool both for studying geomorphological variations in remote island environments and for analyzing the space-time distribution of seabird nests. The storage of captured aerial images allows the creation of a geospatial database

that can be used as a reference for future comparisons. In this sense, the work highlights the importance of implementing/maintaining monitoring programs encompassing geomorphological aspects in reef islands and ecological aspects associated with the nesting of seabirds, especially considering the current context of climate change.

Keywords: shoreline; drone; morphodynamics; central depression; GIS; marine conservation.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVOS	11
1.2	ESTRUTURAÇÃO DO DOCUMENTO	12
2	ARTIGO 1 - VARIAÇÕES GEOMORFOLÓGICAS DE ILHAS RECIFAIS COM ÊNFASE NA INFLUÊNCIA DE UMA DEPRESSÃO CENTRAL INUNDADA	13
3	ARTIGO 2 – ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL E DENSIDADE DE AVES MARINHAS (ANOUS STOLIDUS E ONYCHOPRION FUSCATUS) NA COLÔNIA REPRODUTIVA DE UMA ILHA RECIFAL ATRAVÉS DE RPAS.....	52
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	88
	REFERÊNCIAS	91
	APÊNDICE A - APLICAÇÃO DE RPAS (DRONES) PARA PESQUISA, MONITORAMENTO E FISCALIZAÇÃO EM UNIDADES DE CONSERVAÇÃO MARINHAS: PROTOCOLO OPERACIONAL.....	99

1 INTRODUÇÃO

Os atóis consistem em recifes oceânicos caracterizados por formatos circulares ou elipsoidais que compreendem uma laguna interna e ilhas compostas por sedimentos inconsolidados. Essas ilhas apresentam, em geral, baixa elevação (< 4 m acima do nível do mar) e superfície plana, tendo sua morfologia moldada a partir da topografia da estrutura recifal e dos processos associados às ondas e marés (Beetham et al., 2017; Costa et al., 2019; Kench & Brander, 2016; Woodroffe, 2008; Yamano et al., 2005). Tais características contribuem para que as ilhas recifais sejam bastante vulneráveis aos efeitos das mudanças climáticas e pressões antrópicas.

Projeções de aumento do nível do mar, degradação de recifes de coral, intensificação de eventos extremos e as consequentes alterações na dinâmica de ondas alertam para o risco de inundações e processos erosivos. Por outro lado, esses ambientes apresentam grande relevância ecológica, sendo, por exemplo, comumente utilizados como área de nidificação de aves marinhas (Russell & Kueffer, 2019). A depender da dimensão e intensidade, variações geomorfológicas em ilhas recifais constituem um dos fatores que podem interferir nos habitats utilizados para nidificação (Hatfield et al., 2012; Kench & Cowell, 2001; Perry et al., 2018; Shope et al., 2017; Storlazzi et al., 2015). Nesse sentido, o estudo da topografia e a análise da densidade e distribuição espacial de aves marinhas nesses ambientes são fundamentais para compreender as variações geomorfológicas atuantes, os potenciais efeitos associados e para a obtenção de dados populacionais que podem futuramente subsidiar estratégias voltadas à conservação desse grupo de animais.

Estudos ambientais em áreas remotas possuem diversos obstáculos com relação às metodologias empregadas: dificuldades de acesso e logística operacional, distúrbios nos habitats naturais e na população estudada, coletas temporalmente e economicamente dispendiosas, além da baixa resolução espacial dos dados, que resultam em elevadas margens de erro em métodos tradicionais (Brooke et al., 2015; Carey, 2009; Frederick et al., 2003; Sutherland, 2008). Atualmente, com os avanços tecnológicos, uma alternativa de metodologia vem sendo utilizada e apresentando boa eficácia, podendo ser peça chave no monitoramento de Unidades de Conservação (UC) marinhas: o uso de *Remotely Piloted Aircraft Systems* (RPAS) (Anderson & Gaston, 2013; Brooke et al., 2015; Chabot & Bird, 2015; IV et al., 2006; Koh & Wich, 2012; López & Mulero-Pázmány, 2019; Lowe et al., 2019; Papakonstantinou et al., 2016; Ratcliffe et al., 2015; Seymour et al., 2018). Os RPAS, popularmente conhecidos como drones, são compostos por dispositivos aéreos controlados remotamente capazes de coletar imagens de

alta resolução espacial, permitindo gerar um sistema de mapeamento regular para determinada área de estudo (Gabrlík et al., 2018). Nesse contexto, os RPAS têm apresentado grandes vantagens e.g., praticidade, baixo custo, aquisição de dados de alta resolução espacial e, além disso, rapidez nessa aquisição, facilitando o monitoramento durante pequenos intervalos de tempo, permitindo assim detectar variações geomorfológicas e ecológicas de curto prazo (Lowe et al., 2019; Goebel et al., 2015; Grenzdörffer, 2013; Ratcliffe et al., 2015; Lowe et al., 2019).

O Atol das Rocas (AR), única formação de atol existente no Atlântico Sul, é uma Reserva Biológica (REBIO) e, juntamente com o Arquipélago de Fernando de Noronha, constitui a área mais importante para a reprodução de aves marinhas no Brasil. Desempenha um importante papel na manutenção da biodiversidade, endemismo e proteção de espécies ameaçadas (Bellini et al., 1996; Fischer et al., 2007; MMA, 2010). Considerando que o monitoramento é uma ferramenta indispensável para o sucesso da gestão da REBIO AR, mas sabendo das dificuldades de realizá-lo em uma área marinha remota, um dos principais desafios atuais é que esse monitoramento seja obtido de forma sistemática e eficiente. É nessa perspectiva que os RPAS podem contribuir, atuando como uma medida de conservação marinha e monitoramento. O monitoramento das alterações geomorfológicas das ilhas do Atol, bem como dos aspectos populacionais associados às aves marinhas, é de extrema relevância, sobretudo considerando os efeitos das mudanças climáticas e as ameaças à biodiversidade marinha.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste estudo foi analisar as variações geomorfológicas das ilhas recifais da REBIO Atol das Rocas e a ocupação de duas espécies de aves marinhas que nidificam nesse ambiente através de imagens capturadas por um RPAS (Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada).

Para tanto, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- (i) Verificar as variações geomorfológicas planimétricas e volumétricas nas ilhas da REBIO, identificando locais de erosão e acreção;
- (ii) Detectar a distribuição espaço-temporal e densidade do ninhal de *A. stolidus* e *O. fuscatus* na Ilha do Farol;
- (iii) Avaliar as vantagens e desvantagens do uso de RPAS como ferramenta de monitoramento e contribuir na inovação das técnicas de monitoramento da REBIO Atol das Rocas, que podem ser aplicadas em outras UCs.

1.2 ESTRUTURAÇÃO DO DOCUMENTO

A presente dissertação está estruturada da seguinte forma: primeiramente foi realizada uma introdução geral sobre os aspectos abordados no trabalho e elencados o objetivo geral e os objetivos específicos. Conforme mencionado na introdução, o RPAS foi utilizado como ferramenta tanto para análises geomorfológicas das ilhas recifais inseridas no Atol das Rocas, como para análises ecológicas associadas à distribuição e densidade de aves marinhas na região.

No Capítulo I, foram analisadas as variações morfológicas planimétricas e volumétricas na Ilha do Farol e na Ilha do Cemitério, que apesar de estarem inseridas no mesmo atol apresentam feições particulares que influenciam na estabilidade geomorfológica. No Capítulo II, foram analisadas a densidade e distribuição espaço-temporal dos ninhos de duas espécies de aves marinhas (*Anous stolidus* e *Onychoprion fuscatus*) na Ilha do Farol.

Por fim, são apresentadas as considerações finais do trabalho, integrando os principais resultados obtidos e sugestões de trabalhos futuros.

2 ARTIGO 1 - VARIAÇÕES GEOMORFOLÓGICAS DE ILHAS RECIFAIS COM ÊNFASE NA INFLUÊNCIA DE UMA DEPRESSÃO CENTRAL INUNDADA

RESUMO

As ilhas recifais constituem ambientes vulneráveis aos efeitos das mudanças climáticas especialmente em função de suas dimensões, topografia, constituição geológica e localização, mas as respostas geomorfológicas variam conforme as particularidades de cada região. Esse estudo teve como objetivo analisar as variações planimétricas e volumétricas em duas ilhas recifais (Ilha do Farol e Ilha do Cemitério) inseridas no Atol das Rocas com um enfoque à depressão central existente na Ilha do Farol e sua respectiva dinâmica. Para tanto, foram utilizadas imagens capturadas por RPAS (Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada) e técnicas de geoprocessamento adquiridas durante 4 expedições realizadas entre 2020 e 2022, além de uma imagem de satélite de 2005. Para auxiliar na compreensão dos resultados, também foram analisadas as condições de ondas e correntes da região. O predomínio de erosão em dezembro e de acreção em maio, bem como a migração das extremidades, foram verificados em ambas as ilhas e estão associados à ocorrência de ondulações energéticas (*swell* de norte) entre novembro e abril, especialmente através do canal na borda do anel recifal que conecta o interior do atol com as águas *offshore*. Apesar das ilhas estarem submetidas às mesmas condições ambientais *offshore* e apresentarem algumas variações morfológicas similares, a existência de uma depressão central (baía da lama) na ilha do Farol implica em aspectos particulares que merecem destaque e evidenciam a elevada dinâmica desta feição, sendo eles: (1) a ocorrência de erosão tanto em termos de área como de volume, a curto e longo prazo, na região praial adjacente a nordeste da baía da lama, com perda de sedimentos e de vegetação, permitindo a sobrelavagem de ondas nesse trecho e ameaçando o rompimento de uma crista arenosa (*ridge*); (2) a migração de um dos meandros da baía da lama, que causou a destruição da antiga base de pesquisa; (3) uma bifurcação a norte da baía da lama, que pode ser indício de sua expansão para essa área; (4) a proximidade de um de seus meandros com relação à base atual de pesquisa, sobretudo em marés de sizígia. As características da depressão central e suas variações constituem um fator importante a ser considerado com relação à estabilidade geomorfológica da Ilha do Farol. Sendo assim, o estudo destaca a importância do seu monitoramento especialmente a médio e longo prazo, sobretudo considerando o atual contexto das mudanças climáticas e vulnerabilidade a eventos de inundação e erosão. O mesmo deve ser adotado para outras ilhas recifais que compartilhem deste tipo de feição. Por fim, o RPAS se

mostrou uma ferramenta prática e eficiente para o estudo de variações geomorfológicas em ilhas recifais.

Palavras-chave: ilhas recifais; geoprocessamento; erosão; drone; variações geomorfológicas; SIG.

ABSTRACT

Reef islands are vulnerable to climate change effects, especially due to their dimensions and topography, but geomorphological responses to external factors vary according to the particularities of each region. This study aimed to analyse the planimetric and volumetric changes in two reef islands (Farol Island and Cemitério Island) inserted in Rocas Atoll, the only South Atlantic Atoll, considering the effect of the central depression in this process. For this purpose, images captured by Remotely Piloted Aerial System (RPAS) and geoprocessing techniques acquired during four expeditions carried out between 2020 and 2022 and a satellite image from 2005 were used. To support the comprehension of the results, the wave and current conditions of the region were also analysed. The predominance of erosion in December and accretion in May, as well as edge migration, were observed on both islands and are associated with the occurrence of energetic swells between November and April, especially through the channel at the edge of the reef ring that connects the atoll interior with the offshore waters. Although the islands are submitted to the same offshore environmental conditions and present some similar morphological changes, the existence of a central depression (Lama Bay) in Farol Island implies particular aspects that deserve to be highlighted and evidence of the high dynamics of this feature, which are: (1) the occurrence of erosion both in terms of area and volume, in the short and long term, in the adjacent beach region to the northeast of Lama Bay, with loss of sediment and vegetation, allowing wave overtopping in this stretch and threatening the break-up of a sandy ridge; (2) the migration of one of the meanders of the Lama Bay, which destroyed the old research base; (3) a bifurcation to the north of the Lama Bay, which may be an indication of its expansion into this area; (4) the proximity of one of its meanders to the current research base, especially on spring tides. The features of the central depression and its changes are an important factor to be considered regarding the geomorphological stability of Farol Island. Thus, the study highlights the importance of its monitoring, especially in the medium and long term, considering the current climate change context and vulnerability to

flooding and erosion events. The same should be adopted for other reef islands that share this feature. Finally, RPAS proved a practical and efficient tool for studying geomorphic changes in reef islands.

Keywords: Reef Islands; Geoprocessing; Erosion; Drone; Geomorphic change; GIS.

INTRODUÇÃO

As ilhas recifais são compostas por sedimentos carbonáticos inconsolidados derivados de recifes, algas calcárias e outros organismos marinhos que secretam carbonato de cálcio, como foraminíferos (Stoddart e Steers, 1977; Flood, 2011). Apresentam, em geral, baixa elevação (< 4 m acima do nível do mar), superfície plana e pequena área, tendo sua morfologia moldada a partir da topografia da estrutura recifal e dos processos associados às ondas e marés (Beetham et al., 2017; Costa et al., 2019; Kench & Brander, 2016; Woodroffe, 2008; Yamano et al., 2005). Embora as dimensões e formato das ilhas recifais possam variar consideravelmente (Woodroffe et al., 1999), elas compartilham morfologias transversais semelhantes, com uma crista de praia proeminente voltada para o oceano e uma crista de praia mais moderada voltada para a laguna. As variações nas seções transversais incluem, por exemplo, a presença ou ausência de uma depressão central interior. Essas feições possuem elevação ainda mais baixa comparada à topografia geral da ilha recifal e, portanto, são particularmente mais suscetíveis à inundação (Woodroffe, 2008; Woodroffe e Mclean, 1994; Yamano et al., 2007; McLean et al., 1991).

A maioria das plataformas de recife são geometricamente complexas e as interações entre as ondas e as estruturas do fundo resultam em efeitos particulares na costa (Costa et al., 2027; Costa e Siegle, 2022; Shope et al., 2017). Frequentemente localizadas em ambientes remotos no oceano, as ilhas recifais fornecem a única terra habitável para algumas nações insulares. São também utilizadas como áreas de alimentação e reprodução pela fauna marinha, incluindo aves e tartarugas, e desempenham, portanto, um importante papel na manutenção da biodiversidade, endemismo e proteção de espécies ameaçadas (Bellini et al., 1996; Hatfield et al., 2012; Kench & Cowell, 2001; Perry et al., 2018; Shope et al., 2017; Storlazzi et al., 2015). Apesar da relevância social e ecológica, a baixa elevação e pequena dimensão contribuem para a vulnerabilidade das ilhas recifais aos efeitos das mudanças climáticas e pressões antrópicas.

Projeções do aumento do nível médio global do mar, degradação de recifes de coral, intensificação de eventos extremos e as consequentes alterações na dinâmica de ondas alertam

para o risco de inundações e processos erosivos nestas regiões (Mycoo et al., 2022; IPCC, 2019; Hatfield et al., 2012; Kench & Cowell, 2001; Perry et al., 2018; Shope et al., 2017; Storlazzi et al., 2015). Tais ilhas são consideradas por alguns autores como uma das formas de relevo geomorfologicamente mais sensíveis a mudanças no nível do mar, processos de ondas, suprimento de sedimentos e impactos antrópicos (Dickinson, 1999; Hubbard et al., 2014; Pala, 2014). Estudos sugerem que as ilhas recifais irão sofrer erosão intensa, podendo provocar impactos ecológicos e socioeconômicos, obrigando, por exemplo, povos locais a irem em busca de outros territórios e tornando-os refugiados ambientais (Barnett, 2005; Lowe et al., 2019; McAdam, 2010; Connell, 2013; Klepp, 2014).

Por outro lado, outros estudos recentes apresentam evidências de que as ilhas recifais são formas de relevo robustas que reagem dinamicamente às mudanças nas condições oceânicas e climáticas, apresentando certa resiliência. Estes pesquisadores afirmam que existe um processo contínuo de erosão e acreção, resultando na migração das ilhas em plataformas de recife, estabilidade sedimentar ou até mesmo um aumento de área (Aslam e Kench, 2017; Darson, 2021; Woodroffe et al., 2007; Talavera et al., 2021). Nessa vertente, os autores sugerem que as ilhas vão persistir para além do século 21 (McLean e Kench, 2015).

Existem diversas metodologias utilizadas para analisar as variações geomorfológicas em ilhas recifais, e.g., Woodroffe e Morrison (2001) utilizando a datação por radiocarbono para analisar a evolução e taxa de variação sedimentar em Makin, Kiribati, Oceano Pacífico central; Kench e Brander (2006) fazendo uso de perfis praias e mapeamento com Global Positioning System (GPS) da linha de costa no Atol de Maalhosmadulu do Sul, Maldivas, Oceano Índico; Woodroffe et al. (2007) utilizando a partir técnicas de fotogrametria para gerar o Modelo Digital de Terreno gerado bem como o uso da datação por radiocarbono e na Ilha Warraber, Torres Strait, Austrália.

Atualmente, com os avanços tecnológicos, uma alternativa que vem sendo utilizada com boa eficácia em estudos de dinâmica costeira está associada à aquisição de informações geomorfológicas através dos Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAS) (Araújo et al., 2021; Gonçalves et al., 2022; Zimmerman et al., 2020; Casella et al., 2020). Os RPAS são compostos por dispositivos aéreos controlados remotamente, capazes de coletar imagens de alta resolução espacial, permitindo assim, gerar um sistema de mapeamento regular para uma determinada área de estudo (Gabrlik et al., 2018). Estudos geomorfológicos em áreas remotas, como a maioria das ilhas recifais, possuem diversos obstáculos com relação às metodologias tradicionais empregadas, i.e., dificuldades de acesso e logística operacional, distúrbios nos

habitats naturais, coletas temporalmente e economicamente dispendiosas, baixa resolução dos dados (tanto espacial quanto temporal), que podem acarretar em elevadas margens de erro em métodos tradicionais. Nesse contexto, os RPAS têm apresentado grandes vantagens e.g., praticidade, baixo custo, aquisição de dados de alta resolução espacial e, além disso, rapidez na coleta de dados facilitando o monitoramento durante pequenos intervalos de tempo, permitindo assim detectar variações geomorfológicas de curto prazo (Lowe et al., 2019).

Os dados obtidos através de RPAS, além de permitir um melhor entendimento sobre a dinâmica sedimentar das ilhas, podem documentar e subsidiar futuras comparações associadas à geomorfologia local, sobretudo considerando o contexto de mudanças climáticas. Diante do exposto, o objetivo desta contribuição é obter uma melhor compreensão a respeito das variações geomorfológicas atuantes em duas ilhas recifais inseridas no Atol das Rocas, sendo uma caracterizada pela presença de uma depressão central inundada por maré em seu interior e a outra não. Para isso, foram obtidas informações espaciais e temporais através de RPAS, o que permitiram correlacionar com os seguintes objetivos específicos: (i) mapeamento e extração da linha de costa para o cálculo da taxa de variação e análise das variações planimétricas das ilhas; (ii) análise das variações volumétricas (balanço sedimentar) das ilhas através dos modelos digitais do terreno; (iii) correlação com os dados temporais obtidos por RPAS com as condições de ondas e correntes locais; e (iv) análise das variações geomorfológicas associadas à depressão central. Destaca-se que as amostras foram obtidas considerando duas condições de clima de ondas de água profunda distintas na região (dezembro e maio), buscando observar o efeito da sazonalidade nas variações geomorfológicas.

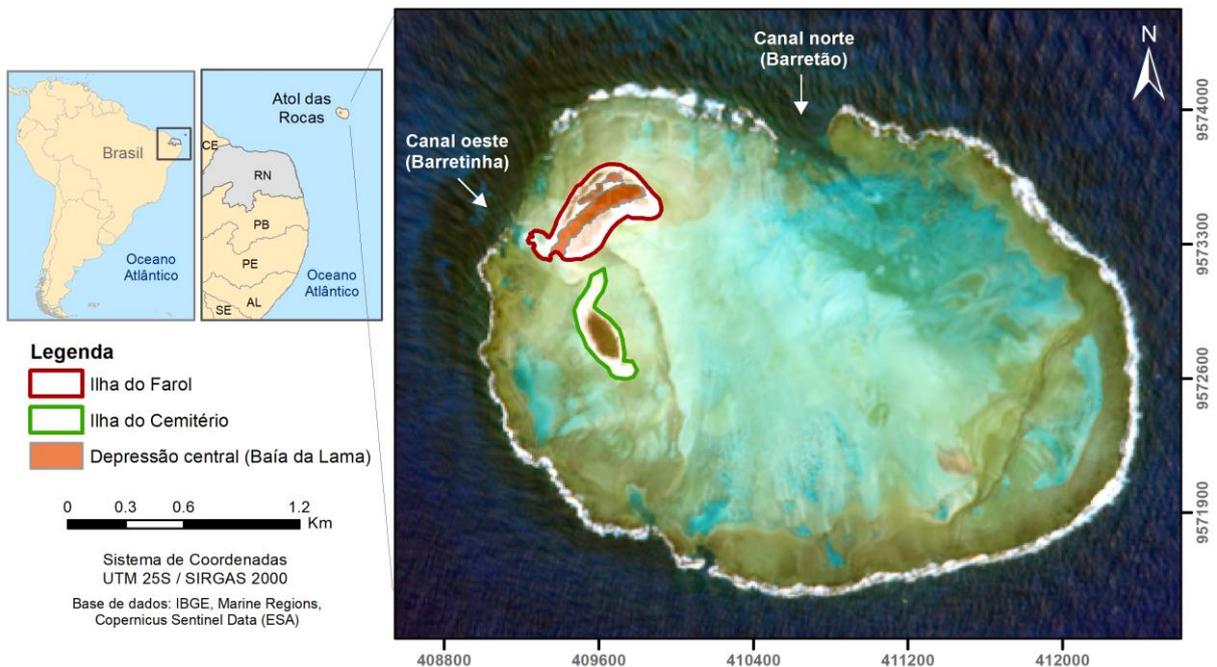
METODOLOGIA

Neste estudo foram utilizadas imagens capturadas através de um Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada (RPAS) para analisar as variações geomorfológicas em duas ilhas recifais do Atol das Rocas, sendo uma delas caracterizada pela presença de uma depressão central. A partir das imagens, capturadas em quatro expedições realizadas durante os anos de 2020 e 2022, foram gerados ortomosaicos e Modelos Digitais de Terreno. Técnicas de geoprocessamento foram aplicadas e parâmetros adicionais, como ondas e correntes, também foram discutidos para a compreensão dos processos morfológicos atuantes.

Área de Estudo

O Atol das Rocas (Lat. 3,863°S; Long. 33,804°W) é um recife anelar elipsoidal composto predominantemente por algas coralíneas, com aproximadamente 3,5 km de comprimento (E-W) e 2,5 km de largura (N-S), situado a 250 km a nordeste da costa brasileira, sendo o único atol existente no Atlântico Sul. A região compreende, dentre outras feições, uma laguna central, um banco de areia (Zulu) e duas ilhas recifais, denominadas Ilha do Farol e Ilha do Cemitério (Fischer et al., 2007) (Figura 1).

Figura 1 - Área de estudo indicando a localização das duas ilhas recifais inseridas no Atol das Rocas (RN), Brasil, Atlântico Sul. Destaque para a presença da depressão central na Ilha do Farol e para os dois canais do anel recifal que conectam as águas *offshore* com o interior do atol.



Fonte: A autora, 2023

As ilhas são de origem biogênica, com sedimentos compostos predominantemente por bioclastos de algas calcárias, foraminíferos e moluscos. A morfologia da Ilha do Farol, situada na porção noroeste do atol, inclui a presença de uma depressão central denominada “Baía da Lama”, formada entre dois esporões da ilha. A baía supracitada fica inundada na maré alta, enquanto que na maré baixa fica praticamente emersa, com exceção de pequenas porções que são submersas em tempo integral. A Ilha do Cemitério possui menores dimensões, ausência de depressão central e é marcada pela ocorrência de substrato consolidado (recifes de arenito) na porção N, NE e W da ilha (COSTA et al., 2017).

Existem duas descontinuidades (canais) no anel recifal que comunicam a parte interna do atol com o seu entorno. O menor canal (conhecido como “Barretinha”), com profundidade de aproximadamente 4 metros, está situado na parte W do atol, próximo à Ilha do Farol. O canal maior (conhecido como “Barretão”), com profundidade variando de 4 a 10 metros e largura que atinge 100 metros, está situado na porção N do atol.

Apesar de pequenas dimensões, as ilhas recifais são extremamente relevantes na manutenção da biodiversidade marinha, sobretudo do Atlântico Sul, podendo também serem utilizadas como instrumento de monitoramento de mudanças climáticas globais (Fischer, 2007; MMA, 2010). Em função do potencial ecológico, através do Decreto-Lei nº83.549/1979, o Atol das Rocas foi estabelecido como Reserva Biológica, sendo a primeira UC marinha do Brasil (Fischer et al., 2007; Soares et al., 2010).

Com relação aos aspectos meteoceanográficos, o Atol está sob influência dos ventos alísios de sudeste, com intensidade média de 5 m.s^{-1} , variando de acordo com a sazonalidade da posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). As ondas, induzidas pelo vento, seguem o mesmo padrão de direção, sendo também presentes ondulações geradas em latitudes médias de ambos os hemisférios (Costa et al., 2017). A altura significativa das ondas na laguna normalmente não excede 0,8 m, mesmo durante a incidência de ondulações oceânicas energéticas (Costa et al., 2022). As condições energéticas das ondas dentro da laguna estão relacionadas principalmente com o *swell* de norte combinado com a maré de sizígia. O atol está inserido numa região de mesomaré e regime semidiurno (Costa et al., 2017). A morfologia do atol e as marés desempenham um papel fundamental no controle das características direcionais e energéticas do clima de ondas da laguna (Costa e Siegle, 2022).

Materiais, Coleta e Processamento de Dados

RPAS

Foram realizadas quatro expedições para a REBIO Atol das Rocas em um período de dois anos (Dez/2020, Mai/2021, Dez/2021 e Mai/2022). O plano de voo foi realizado através do aplicativo DroneDeploy, no qual foram definidos parâmetros como a altura do voo (100 m), a área a ser mapeada (Ilha do Farol e Ilha do Cemitério) e a sobreposição das imagens (75% frontal e 65% lateral). Durante as campanhas, visando aspectos de segurança dos equipamentos e qualidade dos dados, as condições meteorológicas locais foram sempre observadas,

priorizando-se a execução dos mapeamentos em dias caracterizados pela ausência de chuvas e por ventos inferiores a 15 nós. Os mapeamentos foram realizados durante a baixa-mar, de acordo com a tábua de marés da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil, tendo como referência a Ilha de Fernando de Noronha localizada a aproximadamente 150 km da área de estudo. O *drone* utilizado foi o Mavic 2 Zoom desenvolvido pela DJI, cujas características compreendem: (i) tempo máximo de voo de até 31 minutos; (ii) distância máxima de voo de até 18 km; (iii) alcance de precisão de voo de até $\pm 0,1$ metros e $\pm 0,3$ metros na vertical e horizontal, respectivamente; (iv) capacidade de armazenamento que permite o registro de imagens em alta resolução (4K); (v) câmera com sensor CMOS e lentes com FOV de aproximadamente 83° (24 mm) (DJI, 2018).

As imagens coletadas com o RPAS foram processadas usando o *software Agisoft Metashape Professional versão 1.5.1*. As imagens foram ortoretificadas e georreferenciadas. A ortoretificação garante que o mosaico gerado seja representado em uma projeção ortogonal sem efeitos de perspectiva, eliminando deformações adquiridas em campo. O procedimento do processamento incluiu seis etapas principais: (i) adição das imagens capturadas e alinhamento. Nesta fase, o software procura pontos comuns nas fotografias e os combina, assim como encontra a posição da câmera para cada imagem e refina os parâmetros de calibração da câmera. Como resultado, uma nuvem de pontos esparsa e um conjunto de posições de câmera são formados; (ii) importação dos pontos de controle (PCs) e adição dos pontos de checagem. Essa etapa foi realizada identificando os pontos homólogos entre os pontos de controle determinados em campo e os mesmos capturados pelas imagens baseadas em RPAS, manualmente, um a um, em cada imagem. Esse procedimento georreferencia as imagens capturadas e minimiza os erros horizontais e verticais dos produtos fotogramétricos; (iii) geração de uma nuvem de pontos densa, que é construída com base nas posições estimadas da câmera e nas próprias imagens; (iv) geração do Modelo Digital de Elevação (MDE); (v) transformação do MDE para o Modelo Digital de Terreno (MDT); e (vi) geração do ortomosaico.

Pontos de controle - GNSS

Os pontos de controle são utilizados durante o processo fotogramétrico e contribuem nas correções geométricas das imagens. São fundamentais para gerar ortomosaicos e Modelos Digitais de Terreno com qualidade planialtimétrica (mais informações em Gonçalves et al., 2022).

Nos levantamentos realizados foram utilizados 35 pontos de controle pré-sinalizados com dimensões de 40 x 40 cm. Estes foram distribuídos na Ilha do Farol (10 pontos posicionados no entorno do centro da ilha e 10 em sua porção praial) e na Ilha do Cemitério (5 pontos posicionados no entorno do centro da ilha e 10 em sua porção praial). Para a determinação das coordenadas tridimensionais dos pontos de controle foi utilizado um par de receptores GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) geodésicos de dupla frequência (L1/L2) captando sinais GPS e GLONASS.

O método de posicionamento empregado foi o pós-processamento relativo, sendo um receptor considerado como base, coletando dados brutos a partir de um ponto com coordenadas conhecidas, enquanto o outro, móvel, foi utilizado para determinar as coordenadas dos pontos de controle. Para os levantamentos foram definidos os seguintes parâmetros: tempo de ocupação de 2 minutos, taxa de gravação de 1s e máscara de elevação de 15°. As coordenadas obtidas no formato padrão GNSS foram pós-processadas no software *Trimble® Business Center*, considerando o sistema geodésico de referência SIRGAS 2000 (datum oficial brasileiro) bem como o sistema de coordenadas UTM, fuso 25S.

Análises geomorfológicas em SIG

Os produtos gerados no *Agisoft Metashape Professional* (MDT e ortomosaico) foram exportados em formato *.TIFF* e importados como Raster no ArcGIS 10.6.1. As análises das variações geomorfológicas foram realizadas a partir do conjunto de amostras espaço-temporais obtidas. A linha de costa foi vetorizada utilizando como indicador a base do recife e a linha de vegetação (área vegetada). A partir disso, foi possível calcular a área total da ilha e a área vegetada através de operações na tabela de atributos (*Calculate Geometry*), bem como realizar análises planimétricas.

As taxas de variação de linha de costa foram obtidas através da ferramenta *Digital Shoreline Analysis System (DSAS)*, que consiste num complemento do *software ArcGIS*, elaborado pela *United States Geological Service (USGS)* com a finalidade de analisar estatisticamente o comportamento da linha de costa de determinado local ao longo de um determinado período de tempo. O *DSAS* trabalha gerando transectos ortogonais entre linhas de costa distintas e uma linha de base determinada pelo usuário (*baseline*) (THIELER et al., 2009). Foram utilizadas as linhas de costa referente aos períodos Dezembro/2020, Maio/2021, Dezembro/2021 e Maio/2022. Os transectos foram gerados em um espaçamento definido de 15 metros. Em seguida, foram calculadas as taxas de variação da linha de costa através do método

EPR (End Point Rate). O *DSAS* é bastante empregado em estudos voltados à erosão costeira, possibilitando a realização de diagnósticos e a compreensão das dinâmicas praias (LEMOS E SOPCHAKI, 2020; OYEDOTUN, 2014; ALBUQUERQUE et al., 2013; SARWAR E WOODROFFE, 2013; KANKARA et al., 2015). Mais detalhes sobre a ferramenta e os respectivos cálculos podem ser encontrados em HIMMELSTOSS et al. (2021).

Com relação às análises volumétricas, foi calculada a diferença na elevação através da subtração entre MDTs gerados utilizando a ferramenta *Raster Calculator*. Por fim, o quantitativo referente ao balanço sedimentar foi calculado através da ferramenta *Cut Fill (3D Analyst)*, que calcula pixel a pixel a diferença entre o raster inicial e o final, permitindo comparar os MDTs e identificar onde houve ganho ou perda de volume sedimentar. Ao estudar variações volumétricas em ambientes praias, a ferramenta *Cut Fill* é utilizada para quantificar e interpretar visualmente as áreas que ganharam ou perderam sedimento. A medida volumétrica total do material ganho ou perdido pode ser calculada e verificada na Tabela de Atributos do raster (PEPE e COUTU, 2008; DAS ADHIKARI et al., 2016; JOSHUA et al., 2016; DAWSON e SMITHERS, 2010). Mais detalhes da ferramenta podem ser encontrados em ESRI (2021).

Ondas, Correntes e Marés

Os dados utilizados para a caracterização das ondas e correntes *offshore* são referentes à média mensal do período correspondente a cada levantamento aerofotogramétrico (Dez/2020, Mai/2021, Dez/2021 e Mai/2022). Estes incluem a altura significativa, período e direção de onda, velocidade e direção de correntes nas adjacências do Atol das Rocas. Possuem uma resolução espacial de $0,083^\circ \times 0,083^\circ$ e foram obtidos em um intervalo de 6h, através da base de dados do *Copernicus*, um Programa de Observação da Terra oriundo da União Europeia que oferece serviços de informação baseados em dados de satélite e medições *in-situ*. O *Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS)* fornece informações globais de referência regulares e sistemáticas sobre o estado físico e biogeoquímico, a variabilidade e a dinâmica dos ecossistemas costeiros e marinhos. Mais detalhes referentes à base de dados e aos produtos específicos utilizados (GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_WAV_001_027 – ondas; GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHY_001_024 – correntes) podem ser acessados em: <https://resources.marine.copernicus.eu/products>.

Os dados obtidos através da base de dados do *Copernicus* foram processados no *software Matlab* versão 2019a, onde foram gerados gráficos para a média mensal da altura significativa de ondas, período de ondas, velocidade de corrente e direção de corrente.

Os dados de amplitude de maré foram obtidos através do site da Marinha do Brasil

(<https://www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare>), referentes ao período em que os mapeamentos foram realizados (dez/20, mai/21, dez/21 e mai/22). Foram utilizados os dados da Estação Maregráfica 30955, situada em Fernando de Noronha (Baía S. Antonio, Latitude: 3° 50' 2.95" S e Longitude: 32° 24' 9.03" W).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Variações Planimétricas – Ilha do Farol

Variação na Área da Ilha

Com relação às variações das dimensões planimétricas sazonais, foi comparada tanto a área total da ilha (utilizando a base do recife como indicador de linha de costa) como a área emersa (utilizando a linha de vegetação como indicador de linha de costa) entre dezembro de 2020 e maio de 2021 e entre dezembro de 2021 e maio de 2022. Foi possível verificar que no mês de maio ocorreu um aumento na área da ilha do Farol em ambas as comparações realizadas e considerando ambos os indicadores empregados. A Tabela 1 apresenta a área total da Ilha do Farol e a área emersa para cada mês estudado.

Tabela 1 - Área da Ilha do Farol nos respectivos meses estudados.

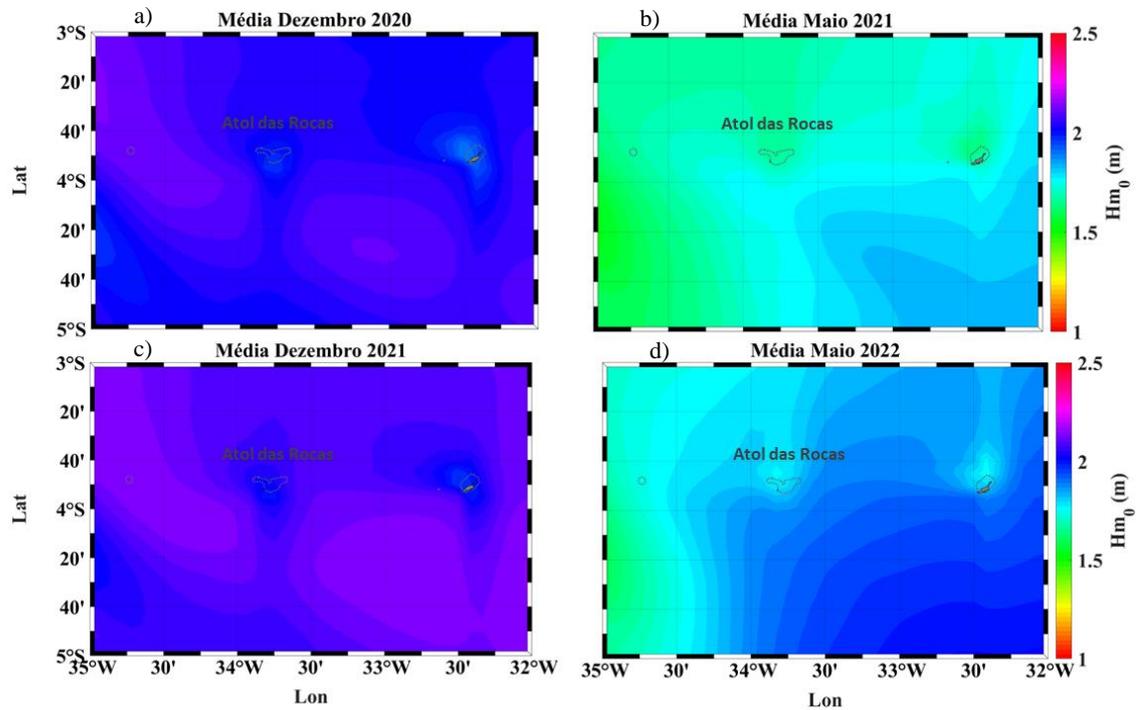
Data	Área total (m²)	Área emersa (linha de vegetação) (m²)
Dez/2020	168918,99	61764,95
Mai/2021	174251,85	63401,45
Dez/2021	170359,97	64526,02
Mai/2022	173198,95	67029,09

Fonte: A autora, 2023

Considerando a área total da ilha, incluindo a baía da lama, a variação planimétrica sazonal (dezembro a maio) foi de + 5332,86 m² (3,1%) no primeiro ano e de + 2838,98 m² (1,6%) no segundo ano de levantamento. O aumento de área sazonal no mês de maio, em comparação ao de dezembro, também foi evidenciado para a área emersa da ilha.

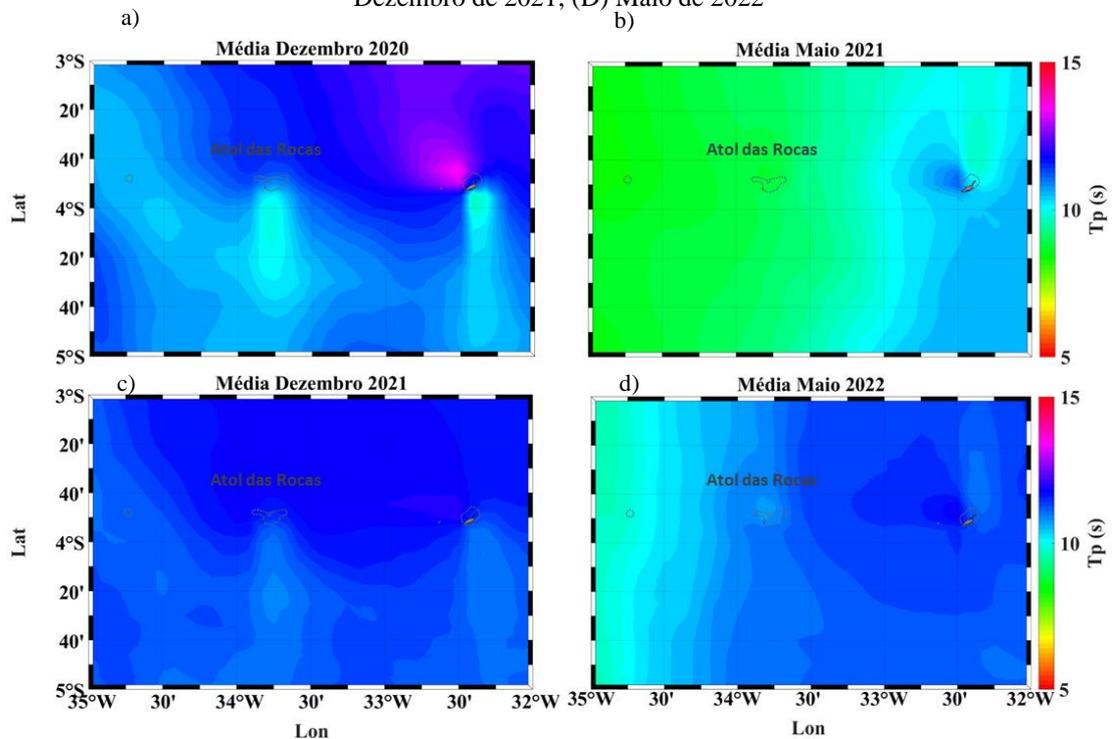
Vale destacar que dezembro, quando predominaram os menores valores de área da ilha, é marcado pela ocorrência de *swell* de norte na região, sendo este gerado por ciclones extratropicais advindos do hemisfério norte. As ondas do tipo *swell* possuem períodos maiores e conseqüentemente mais altura significativa e energia (Figura 2 e Figura 3).

Figura 2 - Altura significativa de ondas (H_{m_0}) durante os meses estudados. (A) Dezembro de 2020; (B) Maio de 2021; (C) Dezembro de 2021; (D) Maio de 2022



Fonte: A autora, 2023

Figura 3 - Período de ondas (T_p) durante os meses estudados. (a) Dezembro de 2020; (B) Maio de 2021; (C) Dezembro de 2021; (D) Maio de 2022



Fonte: A autora, 2023

O *swell* de norte é responsável pela condição mais energética no interior da laguna, juntamente com a maré de sizígia e a morfologia do recife (COSTA et al., 2019; COSTA et al., 2022). Uma vez que as ilhas estão situadas próximo à borda noroeste do atol, elas são mais expostas ao *swell* de norte, o que pode ter contribuído para processos erosivos e redução da área da ilha do Farol durante dezembro. Além disso, a variabilidade direcional de ondas na laguna é principalmente restrita às direções N, NW e NE, que correspondem à localização do canal principal do anel recifal (“barretão”), indicando que as ondas penetram na laguna e atingem a ilha principalmente por essa passagem (Costa e Siegle, 2022). Em maio, após a ocorrência do *swell* de norte, os sedimentos voltam a ser depositados na ilha, contribuindo para o aumento de área evidenciado.

Segundo SHEPPARD et al. (2005) o aumento na energia de onda pode explicar episódios de erosão. NUNN et al. (2017) ao analisar ilhas do Atol Ant, em Pohnpei (Micronésia), destacam a ocorrência de erosão provavelmente provocada por ondas durante a incidência de *swell* de grande amplitude na região. Por outro lado, MANN et al. (2015) analisaram taxas de variação da linha de costa a curto prazo em ilhas recifais do Atol Takú (Nova Guiné) e verificaram que tal variação atinge valor máximo durante um intervalo de tempo em que o atol não foi afetado por ondas de alta energia. O resultado dos autores indica que nem sempre uma condição hidrodinâmica energética irá implicar em uma maior variação da linha de costa.

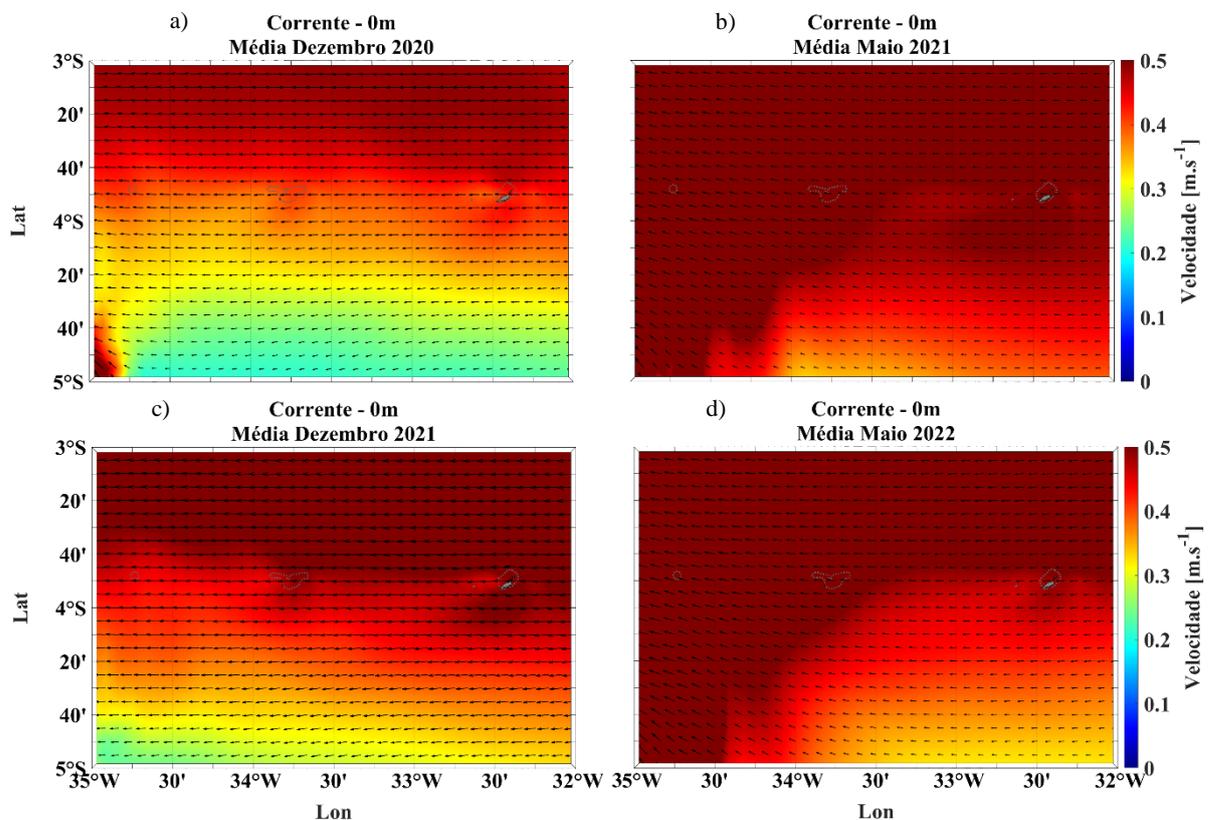
Em escalas sazonais, KENCH E BRANDER (2006) analisaram as variações planimétricas em oito ilhas recifais no Atol Maalhosmadulu, Maldivas, entre 2002 e 2003 em resposta às mudanças sazonais nos ventos das monções de oeste-noroeste para nordeste que ocorrem na região. As ilhas recifais mostraram uma grande variação bruta de área (31-120% da área de praia) e da posição da linha de costa (até 53 m de mudança de praia) entre as estações, estando elas associadas às variações nas condições de vento e ondas. No entanto, a variação líquida anual foi pequena (2–15%), sugerindo que as ilhas exibem espacialmente um equilíbrio dinâmico. A magnitude da mudança morfológica e a sensibilidade das ilhas à mudança variaram entre as ilhas em função da forma da plataforma do recife, que controla os padrões de refração das ondas. Ilhas circulares são consideradas mais sensíveis a mudanças nos padrões de ondas incidentes (KENCH, 2006).

Eventos pontuais também podem contribuir para variações geomorfológicas de curto prazo. Segundo KAYANNE et al. (2016), uma ilha recifal no Japão teve sua área aumentada (quase o dobro do tamanho) após um evento de branqueamento de corais. A mortalidade em

massa dos corais teria contribuído para o transporte dos fragmentos biogênicos pela ação das ondas e posterior deposição e acumulação na ilha.

Além dos fatores já mencionados que influenciam na remoção, transporte e deposição de sedimentos em ilhas recifais, sobretudo associados à condição de ondas, as correntes marinhas também podem contribuir para variações morfológicas em curto prazo. A região do Atol das Rocas é influenciada pelo ramo central da Corrente Sul Equatorial (CSEc), com direção predominante no sentido SE-NO, favorecendo o acúmulo de sedimentos na porção NO do atol, onde se encontra a Ilha do Farol (Lino et al., 2014). A CSEc se intensifica no Atlântico Tropical no período de março a julho e enfraquece de agosto a fevereiro (MOLINARI, 1982; PAES, 2018). Maio é o mês em que a velocidade da corrente supracitada se encontra mais elevada (TCHAMABI, 2017) (Figura 4), o que pode ter contribuído para a intensificação do transporte de material biogênico da plataforma recifal para o interior do atol e deposição em sua porção a NO.

Figura 4 - Velocidade (média mensal) e Direção das correntes superficiais nas adjacências do Atol das Rocas em: (a) Dezembro de 2020; (b) Maio de 2021; (c) Dezembro de 2021; (d) Maio de 2022.



Fonte: A autora, 2023

É válido reforçar, portanto, que as variações planimétricas em ilhas recifais ocorrem em função de vários parâmetros, incluindo composição sedimentar das ilhas, frequência de

tempestades, produção de sedimentos, transporte e redistribuição, e dependem de diferentes estágios evolutivos da ilha (PERRY et al., 2013). A importância relativa de cada um desses parâmetros varia entre os atóis e, conseqüentemente, a frequência e a magnitude das mudanças de curto prazo podem diferir localmente.

Com relação às variações morfológicas da Ilha do Farol em longo prazo, ainda considerando sua área total, em 2012, COSTA *et al.* (2017) identificaram uma área de 161720 m² (utilizando como indicador a base do recife). Comparando com o presente estudo, através da média entre os quatro levantamentos, é possível verificar que houve um aumento de 5,8 % na área total da ilha nos últimos 10 anos.

A variação planimétrica positiva (aumento de área) em longo prazo também foi registrada em diversas ilhas recifais em outras regiões mundo. SENGUPTA et al. (2021) verificaram que 47% de 71 ilhas recifais do Pacífico apresentaram um processo significativo de acreção, resultando em um aumento de área correspondente a 2,45% em uma escala decadal. WEBB e KENCH (2010), analisando as variações planimétricas em 27 ilhas no Pacífico central considerando um período de 20-60 anos, verificaram um predomínio de estabilidade e aumento de área insular. Os autores demonstram a persistência e expansão de ilhas recifais apesar do aumento do nível do mar. ASLAM e KENCH (2017) quantificaram variações planimétricas em 184 ilhas recifais no atol Huvadho, República das Maldivas, nas últimas quatro décadas. Analisando as variações morfológicas planimétricas nas últimas décadas em 709 ilhas situadas em atóis do Oceano Pacífico e Índico, DUVAT (2018) verificou que 88,6% delas apresentaram estabilidade ou aumento de área. TALAVERA et al. (2021) verificaram que a área da Ilha One Tree (Austrália) expandiu em 7% de 1978 a 2019 e que ajustes decadais brutos significativos foram governados pela quantidade, intensidade, proximidade e posição relativa dos ciclones, bem como pelas fases do El Niño Oscilação Sul (ENSO). WOODROFFE e MORRISON (2001) sugerem que as ilhas recifais presumivelmente continuarão a se acumular enquanto a ecologia da plataforma do recife adjacente permanecer adequada para o crescimento de foraminíferos.

Com relação à variação planimétrica da área emersa (vegetada) da Ilha do Farol em curto prazo, houve um aumento consecutivo entre os levantamentos, com o mês de dezembro/2020 apresentando valor mínimo (61764,95 m²) e o mês de maio/2022 apresentando o valor máximo (67029,09 m²). Comparando o levantamento mais antigo (dez/20) com o mais recente (mai/22), houve um aumento de 7,85 % nesta área. Comparando os anos utilizando o mesmo mês como referência, houve um aumento de 5,4% em maio e 4,3% em dezembro.

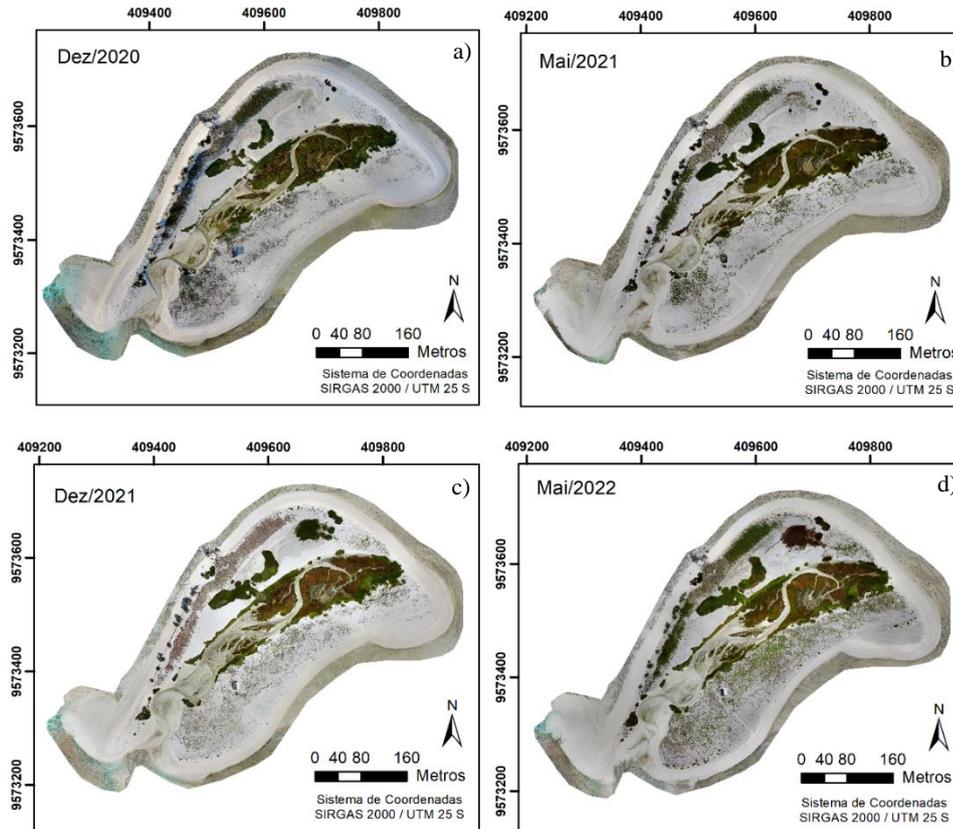
Apesar do aumento na área emersa da ilha em uma análise de curto prazo, o mesmo não foi observado considerando uma maior escala de tempo. Em 2012, COSTA *et al.* (2017) identificaram na Ilha do Farol uma área emersa na ilha do Farol (utilizando como indicador a linha de vegetação) correspondente a 120300 m². Comparando com o presente estudo, através da média entre os quatro levantamentos, é possível verificar que houve uma redução de 46,7% na área emersa da Ilha do Farol nos últimos 10 anos. Sendo assim, é importante um monitoramento a longo prazo para verificar se a redução verificada nos últimos 10 anos ainda persiste. A ilha, especificamente a sua área emersa, é de extrema importância ecológica, sendo utilizada como local de nidificação de aves marinhas, abrigando a maior colônia reprodutiva do atobá mascarado (*Sula dactylatra*) e da viuvinha marrom (*Anous stolidus*) no Brasil e de trinta-réis (*Onychoprion fuscatus*) no mundo (Schulz-Neto, 2004). Adicionalmente, compreende a segunda maior área reprodutiva de tartaruga verde (*Chelonia mydas*) no Brasil (Bellini et al., 1996). Portanto, o monitoramento e compreensão de sua dinâmica sedimentar tornam-se ainda mais essenciais considerando os possíveis impactos ecológicos das variações morfológicas.

Variação na Posição de Linha de Costa

A partir dos ortomosaicos gerados através das imagens capturadas pelo RPAS durante as quatro expedições realizadas (Figura 5), foram delimitadas as posições da linha de costa (Figura 6) utilizando como indicador a base do recife. Analisando a posição da linha de costa é possível verificar que, em geral, a Ilha do Farol não apresentou grandes variações durante o período estudado, com exceção das duas pontas da ilha situadas próximo aos canais existentes no atol que conectam a laguna com as águas *offshore*, constituindo regiões mais dinâmicas: uma ponta na porção nordeste, próxima ao “Barretão” - canal principal e zona mais energética de propagação de ondas para a laguna - e outra na porção sudoeste, próxima à “Barretinha”. De antemão, é possível verificar que entre dezembro e maio ocorre um transporte de sedimentos no sentido anti-horário na ponta a sudoeste da ilha e um transporte de sedimentos no sentido horário na ponta a nordeste. Ou seja, verifica-se uma migração das duas pontas (spits) em direção à laguna. Essa migração é resultado do período mais energético de ondas advindas do hemisfério norte, que inicia em novembro, vai intensificando ao longo dos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, começa a reduzir em março e abril, e finaliza em maio. A ação das ondas, sobretudo associada à passagem do Barretão, contribui para a erosão no lado da ilha voltado para o oceano e para o acúmulo de sedimentos no lado da ilha voltado para a laguna. A longo prazo, essa erosão pode ser um dos mecanismos que provoca a migração da ilha do Farol em

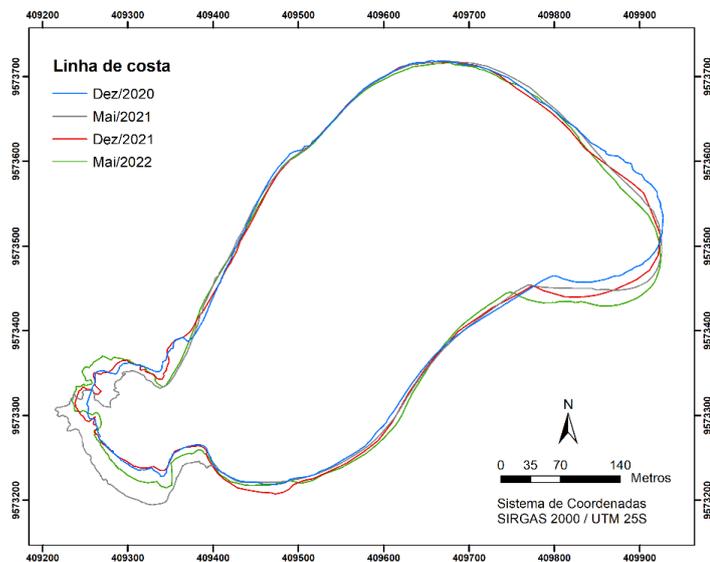
direção à laguna. Esse tipo de resposta geomorfológica à ação de ondas também foi verificado em outras ilhas recifais (Sengupta et al., 2021; Tuck et al., 2019).

Figura 5 - Ortomosaicos da Ilha do Farol obtidos a partir das imagens capturadas pelo RPAS durante as quatro expedições realizadas. (a) Dezembro/2020; (b) Maio/2021; (c) Dezembro/2021; (d) Maio/2022.



Fonte: A autora, 2023

Figura 6 - Posição da linha de costa da Ilha do Farol durante os quatro meses estudados.

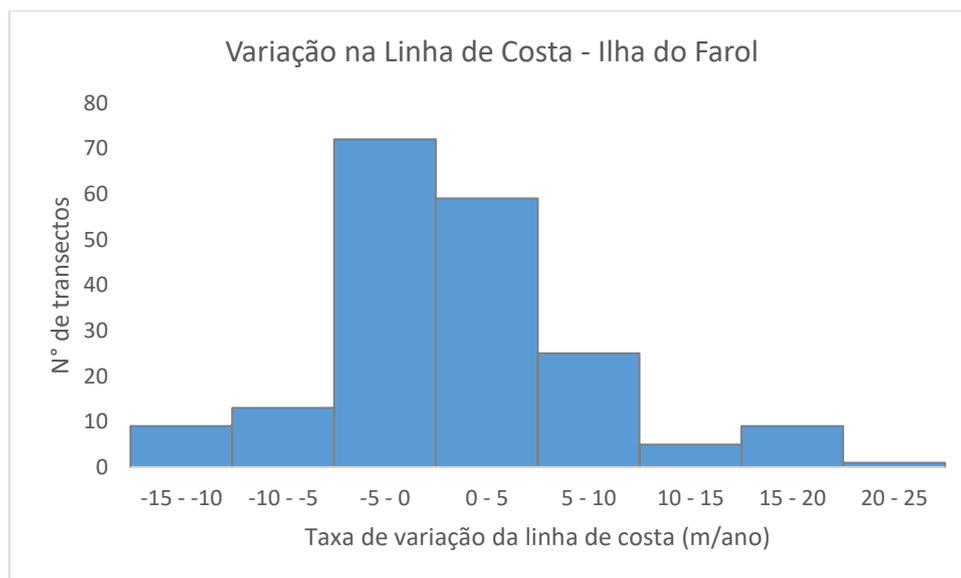


Fonte: A autora, 2023

Em outras ilhas recifais, a posição da linha de costa também se mostrou alinhada com a variabilidade sazonal no clima de ondas (BONESSO et al., 2020).

Através da ferramenta DSAS foi possível analisar as taxas de variação da linha de costa da Ilha do Farol através de transectos delimitados em toda a extensão da ilha de 2020 a 2022. Na figura a seguir (Figura 7), essas taxas encontram-se separadas em intervalos de 5m/ano e verifica-se o número de transectos correspondentes a cada classe. É possível perceber que a maior parte da ilha (maior número de transectos) apresentou uma variação de linha de costa entre -5 e +5 m/ano durante o período estudado. Considerando todos os 194 transectos realizados no perímetro da ilha, 98 deles apresentaram valores negativos para as taxas de variação de linha de costa (erosão) e 96 apresentaram valores positivos (progradação).

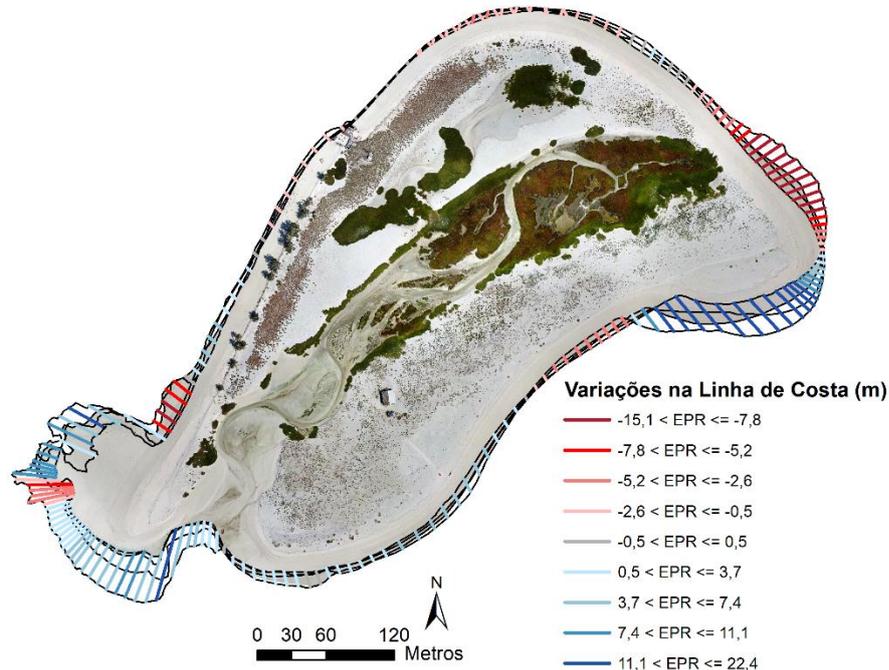
Figura 7 - Taxa de variação da linha de costa na Ilha do Farol durante o período analisado.



Fonte: A autora, 2023

A Figura 8 apresenta as taxas de variações na linha de costa obtidas através do método estatístico EPR (End Point Rate) utilizando a ferramenta DSAS do ArcGIS. O método EPR permite o cálculo de variação de linha de costa dividindo a distância pelo tempo decorrido entre a linha de costa mais antiga e a mais recente (OYEDOTUN, 2014).

Figura 8 - Variações na linha de costa da Ilha do Farol. Transectos em tons de vermelho indicam que houve retração na linha de costa e transectos em tons de azul indicam progradação (2020-2022).



Fonte: A autora, 2023

Taxas elevadas de variação na linha de costa foram encontradas nas extremidades da ilha, próximo à “Barretinha” (sudoeste da ilha) e especialmente próximo ao “Barretão” (nordeste da ilha), evidenciando uma elevada dinâmica sedimentar. O maior recuo da linha de costa foi de -15,1 m/ano e a maior progradação foi de +22,4 m/ano, ambos detectados nesta região. A progradação da linha de costa indica um crescimento desta ponta da ilha em direção à laguna. A longo prazo, caso este comportamento morfológico continue, existe a possibilidade deste prolongamento contribuir para a formação de uma nova depressão central na ilha do Farol. Analisando o modelo evolutivo desta ilha proposto por Costa et al. (2017), a formação da depressão central já existente na Ilha do Farol foi iniciada a partir do prolongamento desta ponta situada a nordeste da ilha.

Apesar da direção predominante das ondas *offshore* ser de sudeste, devido à interação com a topografia recifal e aos respectivos processos de refração, as ondas adquirem no interior do atol uma direção predominante de noroeste, norte e nordeste (COSTA e SIEGLE, 2022). Tal condição pode ter contribuído para a migração da linha de costa detectada nas duas pontas da ilha do Farol (sentido horário nas proximidades do barretão, influenciada sobretudo pelas ondas de direção NE, e anti-horário junto à barretinha, influenciada sobretudo pelas ondas de direção NW). A presença do largo canal (Barretão) na margem a sotavento do atol tem um papel

importante no padrão de refração das ondas, permitindo que ondas *offshore* de diferentes direções penetrem na laguna com menos dissipação (COSTA et al., 2019). Além disso, vale ressaltar que a ilha está situada na porção noroeste do atol e a apenas alguns metros da borda do recife, o que contribui para que sua morfologia seja ainda mais influenciada por ondas advindas dessa direção. Outro ponto importante a considerar é que a crista do recife deste lado é mais baixa do que a crista do lado exposto (COSTA et al. 2019). Assim, na maré alta a coluna de água aumenta, permitindo maior transmissão de energia das ondas para a laguna nesta região. Destaca-se, adicionalmente, que a remobilização direta de sedimentos pelas ondas ocorre especialmente na maré alta, quando ondas mais enérgicas penetram na laguna (COSTA e SIEGLE, 2022; COSTA et al., 2017b; CALLAGHAN *et al.* 2006; HENCH et al. 2008; LOWE *et al.* 2009b; COSTA et al. 2017a). De forma pragmática, apesar das taxas de variação de linha de costa identificadas neste estudo terem sido relativamente elevadas, em geral as taxas de erosão são compensadas pelas taxas de progradação, demonstrando um equilíbrio morfodinâmico a curto prazo na Ilha do Farol.

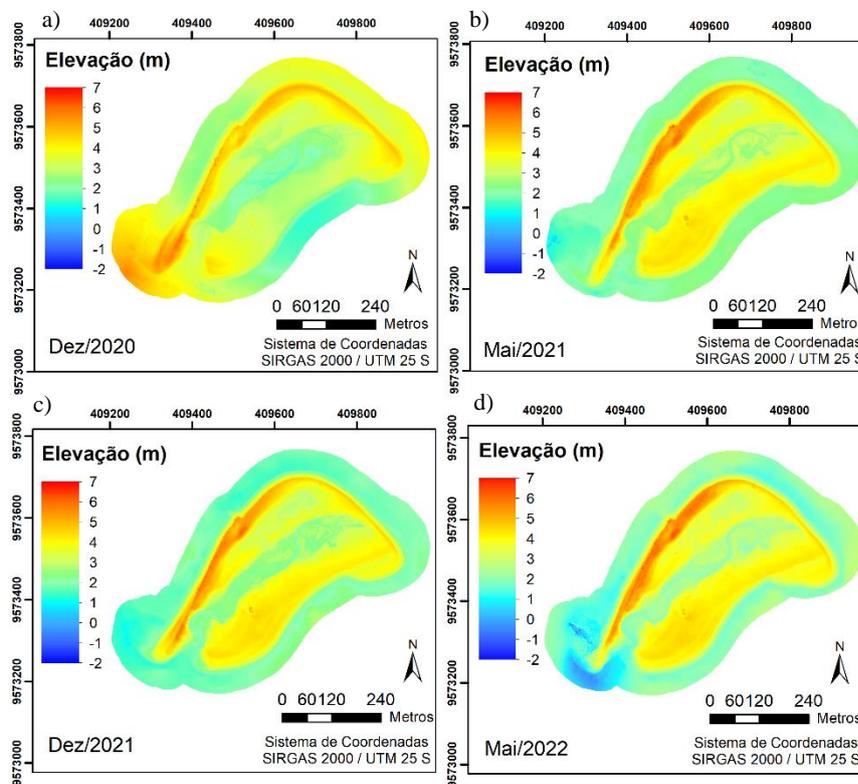
MANN et al. (2015) analisaram taxas de variação de linha de costa em ilhas recifais do Atol Tokú em diferentes escalas temporais (curto, médio e longo prazo). Em curto prazo (intervalo de 2 a 3 anos), os autores detectaram EPRs variando de $-6,92 \pm 0,93$ m/ano a $+7,54 \pm 0,53$ m/ano. Quando todos os transectos dos diferentes intervalos de tempo foram comparados, houve um predomínio de menores taxas de variação da linha de costa durante análises de longo prazo (escalas decadais) e análises de curto prazo em geral apresentaram as maiores taxas. DAWSON (2021) utilizou 45 linhas de costa para quantificar as variações morfodinâmicas de uma ilha recifal durante uma escala temporal de 57 anos. O autor identificou que entre 1963 e 2020 houve um movimento médio líquido da linha de costa de $-4,71$ m e uma taxa média de recuo de $-0,11$ m/ano. Entretanto, apenas 23% das linhas de costa exibiram uma erosão estatisticamente significativa, enquanto que 77% permaneceu estável. STORLAZZI et al. (2015) sugerem que taxas de recuo da linha de costa são substancialmente mais elevadas em áreas expostas à alta energia de ondas.

A partir dos estudos supracitados, comparando a taxa máxima de variação da linha de costa negativa (-15 m/ano) e positiva ($+22,4$ m/ano) com outras regiões do mundo, verifica-se que a Ilha do Farol apresenta uma elevada dinâmica sedimentar no que se refere à variação da linha de costa em curto prazo.

Variações Volumétricas - Ilha do Farol

A Figura 9 apresenta os Modelos Digitais de Terreno (MDTs) gerados para cada período de levantamento. O RMSE (Erro Quadrático Médio) com relação ao eixo Z variou de 2,04 a 7,56 cm ($4,77 \pm 2,67$). É possível verificar maiores elevações em torno de 6 a 7 metros. Como reflexo do regime de ventos (preferencialmente Sudeste e Leste) e direção de corrente, ocorre maior quebra de ondas a barlavento do atol, tornando sua morfologia mais íngreme que a sotavento (COSTA et al., 2019). Já as menores elevações apresentam em torno de 2 metros e estão associadas à depressão central existente na ilha.

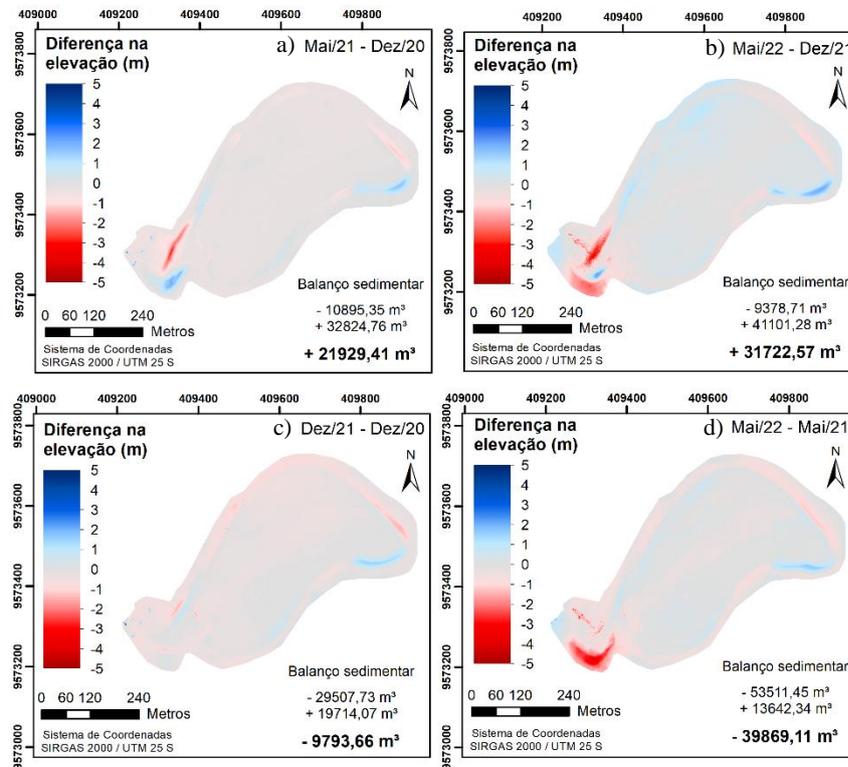
Figura 9 - Modelos Digitais de Terreno da Ilha do Farol. (a) Dezembro de 2020; (b) Maio de 2021; (c) Dezembro de 2021; (d) Maio de 2022.



Fonte: A autora, 2023

A Figura 10 apresenta a diferença na elevação (m) e o balanço sedimentar (m^3) da Ilha do Farol durante o período analisado. Comparando os dois meses estudados foi verificado um balanço sedimentar negativo sazonal (entre maio e dezembro), indicando a predominância de processo erosivo neste último mês tanto em 2020-2021 como em 2021-2022. Os resultados seguem o mesmo padrão verificado para as variações planimétricas: o mês de dezembro foi marcado por uma redução tanto na área da ilha como no volume de sedimentos.

Figura 10 - Diferença na elevação (m) e Balanço Sedimentar (m^3) da Ilha do Farol (a) entre Dezembro de 2020 e Maio de 2021; (b) entre Dezembro de 2021 e Maio de 2022; (c) entre Dezembro de 2020 e Dezembro de 2021; (d) entre Maio de 2021 e Maio de 2022



Fonte: A autora, 2023

Também é possível verificar que com relação à dinâmica sedimentar verificada através da diferença na elevação entre os períodos estudados, a ilha também se mostrou mais dinâmica nas duas extremidades próximas às conexões da laguna com o oceano, o “barretão” a nordeste e a “barretinha” a sudoeste. Esses pontos também foram caracterizados pelas maiores taxas de recuo e avanço na linha de costa, conforme descrito anteriormente.

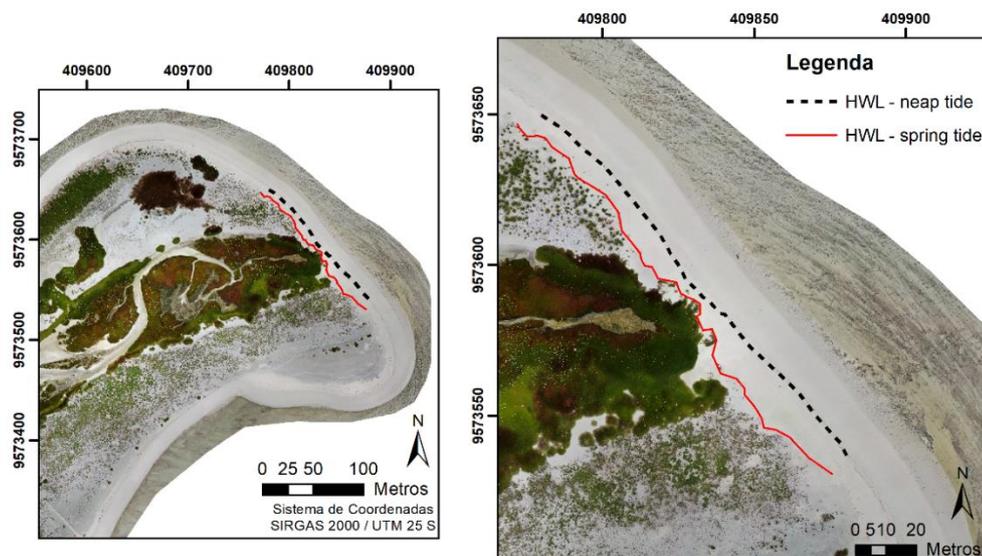
Com relação à variação volumétrica anual, foi possível verificar uma perda de sedimentos no último ano de levantamento, tanto entre dez/20 e dez/21 como entre mai/21 e mai/22. Neste caso, maio apresentou a maior variação volumétrica, com uma perda de -39869,11 m^3 de sedimentos em 2022 em comparação ao mesmo mês em 2021. Vale destacar que em 2022 a altura média e o período de onda, considerando as condições *offshore*, estiveram mais elevadas do que em 2021, o que pode ter contribuído para a intensificação dos processos erosivos. A maior redução no volume sedimentar foi identificada na ponta da ilha situada próximo à barretinha.

Variações Geomorfológicas Associadas à Baía da Lama

A presença de uma depressão central denominada “Baía da Lama” na Ilha do Farol requer uma maior atenção com relação às variações morfológicas desta ilha. Destaca-se que a depressão central é uma feição compartilhada por diversas ilhas recifais em outras regiões do mundo, entretanto não existem estudos focados em sua dinâmica. Em ilhas recifais inseridas nos atóis do Pacífico, como no caso do Atol de Funafuti (Tuvalu), alguns efeitos das mudanças climáticas (aumento do nível do mar, intensificação de ondas, tempestades e eventos extremos) já contribuem para a inundação e intrusão salina especialmente nas depressões centrais, representando uma ameaça significativa para os setores agrícolas e segurança alimentar na região (Yamano et al., 2007; Webb, 2007; Gibson et al., 2019; Woodroffe, 2008). Biribo (2012) ressalta que outros fatores que contribuem para os riscos de inundações associadas às depressões centrais incluem a conexão direta das depressões com o oceano e a laguna, bem como a largura e elevação das cristas arenosas adjacentes a essas feições.

A Figura 11 destaca uma região considerada relativamente crítica em termos de erosão associada à Baía da Lama, no Atol das Rocas. Analisando a região supracitada é possível verificar que os limites entre a vegetação que bordeja a baía e a linha de maré alta (do inglês, High Water Line – HWL) considerando a maré de sizígia já se coincidem e o limite entre essa vegetação e a linha de maré alta considerando a maré de quadratura chega a distanciar apenas 2,5 metros. Durante o período de sizígia, é verificada a ausência de pós-praia, um indicador de erosão, em alguns pontos desta região.

Figura 11. Linha de Preamar na maré de quadratura (neap tide) e na maré de sizígia (spring tide) em trecho da Ilha do Farol.

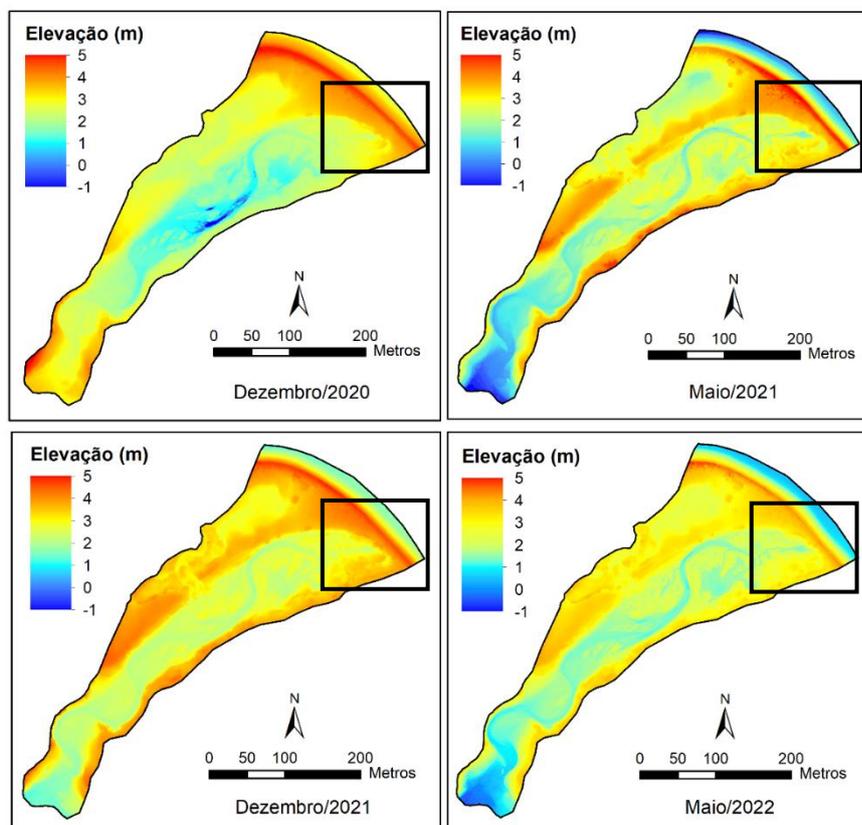


Fonte: A autora, 2023

Ainda com relação a essa região, é possível verificar que o déficit de sedimentos foi verificado tanto em termos de área, através das análises planimétricas, como em termos de volume, conforme ilustrado na Figura 8 e Figura 10. Além disso, a erosão aconteceu independente da sazonalidade.

Com relação à topografia da Baía da Lama, é possível verificar cotas de até 3 metros. Em suas adjacências, a elevação chega a 5 metros. Na região considerada crítica mencionada anteriormente (a nordeste do canal principal da baía) é possível verificar um estreitamento e uma redução na elevação a curto prazo (Figura 12).

Figura 12 - Modelo Digital de Terreno da depressão central (baía da lama), com foco na região praial entre esta feição e a laguna adjacente a nordeste.

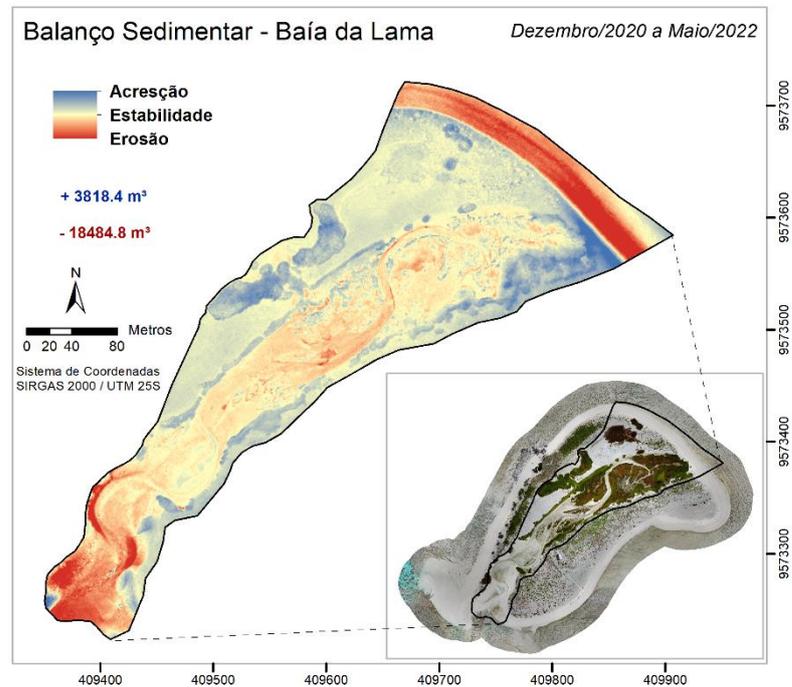


Fonte: A autora, 2023

A Figura 13 apresenta o balanço sedimentar na Baía da Lama entre dezembro de 2020 e maio de 2022. Em termos quantitativos, houve uma redução de 18483,89 m³ no volume de sedimentos e um aumento de 3817,52 m³, resultando em um déficit de -14666,37 m³. Em suas margens, em geral, houve um predomínio de acreção, associado também ao crescimento da vegetação típica do local. Já em sua desembocadura, o predomínio foi de erosão. O que chama

atenção, no entanto, é o predomínio de erosão em toda a porção praial adjacente a nordeste à referida baía.

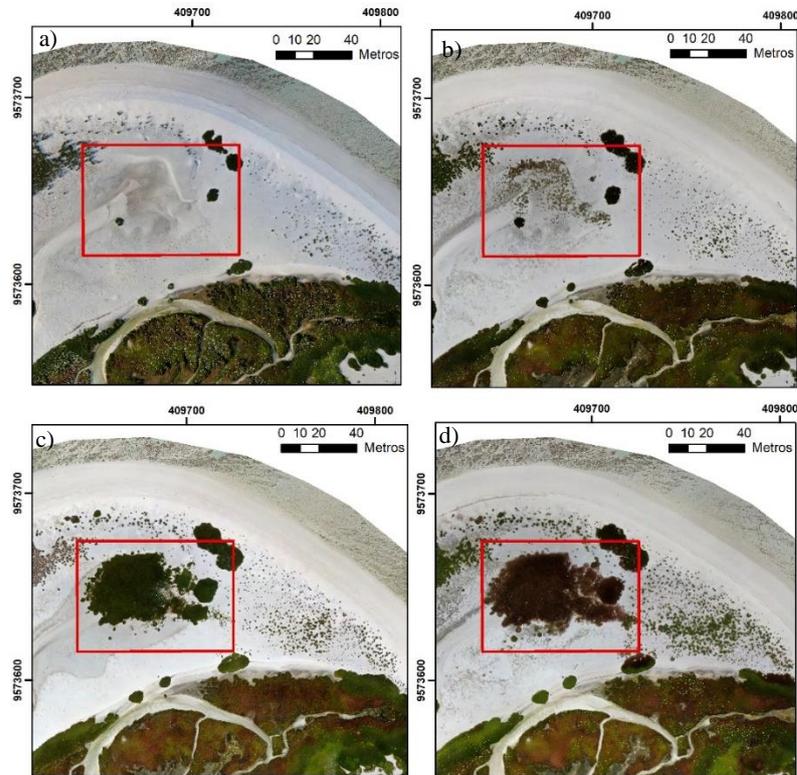
Figura 13 – Balanço sedimentar na Baía da Lama e entorno entre dezembro de 2020 e maio de 2022.



Fonte: A autora, 2023

Com relação à vegetação típica da Baía da Lama, além do crescimento verificado em suas margens imediatas, durante os anos analisados houve o novo estabelecimento de uma parte da vegetação associada à sua bifurcação (Figura 14), o que pode ser um indício da expansão da baía para essa área.

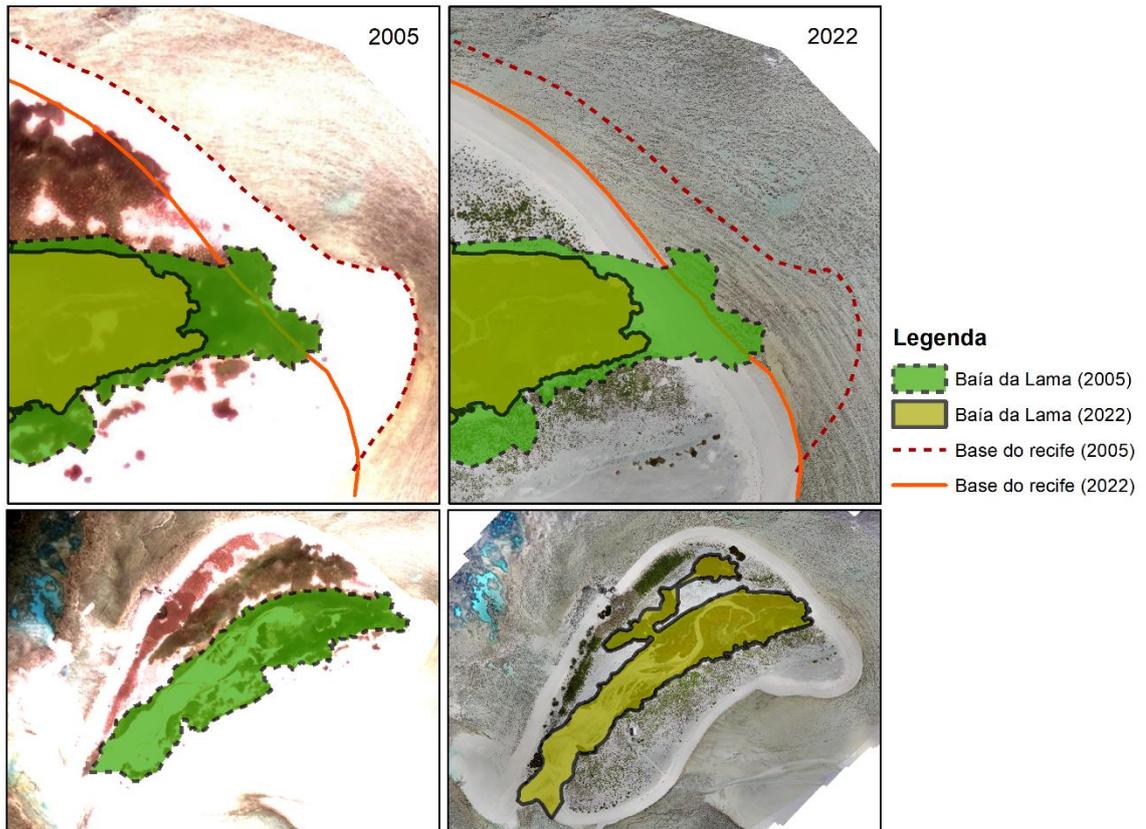
Figura 14 - Crescimento da vegetação adjacente à Baía da Lama, na Ilha do Farol. (a) Dezembro de 2020; (b) Maio de 2021; (c) Dezembro de 2021; (d) Maio de 2022



Fonte: A autora, 2023

Em uma maior escala temporal, comparando a Baía da Lama registrada em 2005 com ela em 2022, é possível verificar que houve um recuo na linha de costa nos últimos 17 anos na região tanto considerando como indicador a linha de vegetação como a base do recife (Figura 15). Ou seja, houve redução de sedimentos e da vegetação que bordeja a baía neste local a longo prazo. Além disso, outras mudanças foram observadas em sua morfologia durante esse período, como o estabelecimento de uma nova bifurcação e um estreitamento lateral.

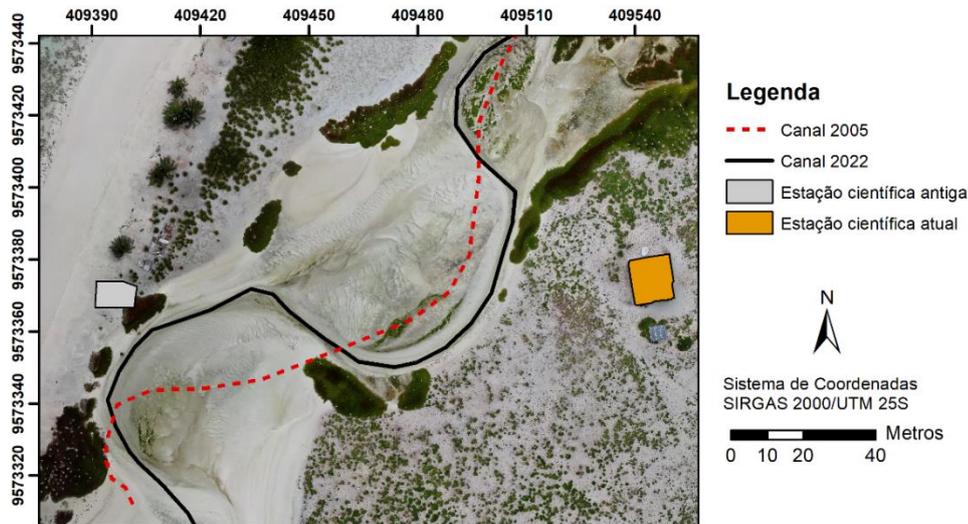
Figura 13 - Variação na baía da lama a longo prazo considerando dois indicadores de linha de costa: a base do recife e a linha de sua vegetação.



Fonte: A autora, 2023

Vale destacar que as variações na morfologia da Baía da Lama já exigiram uma intervenção para adaptação: em 2008 foi necessário transferir a base científica inaugurada em 1993 para o local atual (Figura 16) em função de um processo de erosão no talude da referida baía, logo atrás da base antiga, que começou a comprometer sua edificação.

Figura 14. Variação no canal principal da Baía da Lama entre 2005 e 2022 e localização da estação científica antiga e atual.



Fonte: A autora, 2023

No entanto, ainda é importante atentar para possíveis alterações futuras, sobretudo a longo prazo, com relação à proximidade de um dos meandros da Baía da Lama com a atual base de pesquisa. Em 2005, a distância mínima entre o canal principal da baía e a base científica era de 46,3 metros. Em 2022, essa distância passa a ser 34,7 metros. Ou seja, em 17 anos nessa região houve um deslocamento de 11,6 metros no canal principal em direção à base.

As observações elencadas destacam, portanto, quatro pontos críticos associados às variações morfológicas na Baía da Lama a curto e longo prazo:

- (1) a ocorrência de erosão tanto em termos de área como de volume, em curto e longo prazo, na região praial adjacente a nordeste da baía da lama, com perda de sedimentos e de vegetação, permitindo a sobrelavagem de ondas nesse trecho e ameaçando o rompimento da crista arenosa (ridges). Tal fato pode contribuir para uma possível conexão da baía da lama com a laguna do lado oposto (a NE), especialmente em marés de sizígia, separando a ilha do farol em duas pequenas ilhas em um futuro não tão distante, sobretudo considerando o histórico da evolução geomorfológica da ilha (Lino et al., 2014; Costa et al., 2017);
- (2) a migração de um de seus meandros, que causou a destruição da antiga base de pesquisa (sede do ICMBIO);
- (3) uma bifurcação a norte da baía da lama, que pode ser indício de sua expansão para essa área;

- (4) a proximidade de um de seus meandros com relação à base atual de pesquisa, sobretudo em marés de sizígia.

Tais observações demonstram que a Baía da Lama é uma feição dinâmica e, portanto, interfere na estabilidade geomorfológica da Ilha do Farol. Além disso, destaca-se que as ondas interferem nessa dinâmica, uma vez que as correntes no interior do atol são regidas pelo mecanismo de *wave pumping* em conjunto com a maré, conforme descrito em Costa et al. (2017). Nesse contexto, eventos extremos de ondas em conjunto com marés de sizígia podem favorecer os eventos de sobrelagem de ondas para a Baía da Lama (Costa et al. 2022), contribuindo para alterações em sua morfologia.

Destaca-se, por fim, que a referida baía é bastante utilizada por tubarões-limão (*Negaprion brevirostris*), seja como área de berçário, refúgio, alimentação e proteção contra predadores, sendo observados indivíduos em diferentes estágios ontogenéticos (neonatos, juvenis, adultos) no local (CORRÊA et al., 2015; FREITAS et al, 2006; OLIVEIRA et al., 2011). Caso a hipótese da conexão entre essa depressão central e a laguna adjacente a NE se concretize, alterações hidrodinâmicas, morfológicas e ecológicas podem surgir e interferir no hábito das espécies que ali habitam ou transitam. Além disso, acompanhar a migração da baía, bem como eventuais bifurcações, pode fornecer subsídios para adaptações a longo prazo, caso haja necessidade.

Variações Planimétricas – Ilha do Cemitério

Varição na Área da Ilha do Cemitério

Com relação às variações planimétricas na Ilha do Cemitério, foi possível verificar um breve aumento de na área insular de dezembro para maio considerando o primeiro ano analisado (+ 297,36 m² = 0,4%) e o segundo (+1673,43 m² = 2,5%). A porcentagem de aumento de área na Ilha do Cemitério foi similar à Ilha do Farol. A Tabela 2 apresenta a área total da Ilha do Cemitério (utilizando como indicador a base do recife) e a área emersa (utilizando como indicador a linha de vegetação) para cada mês estudado.

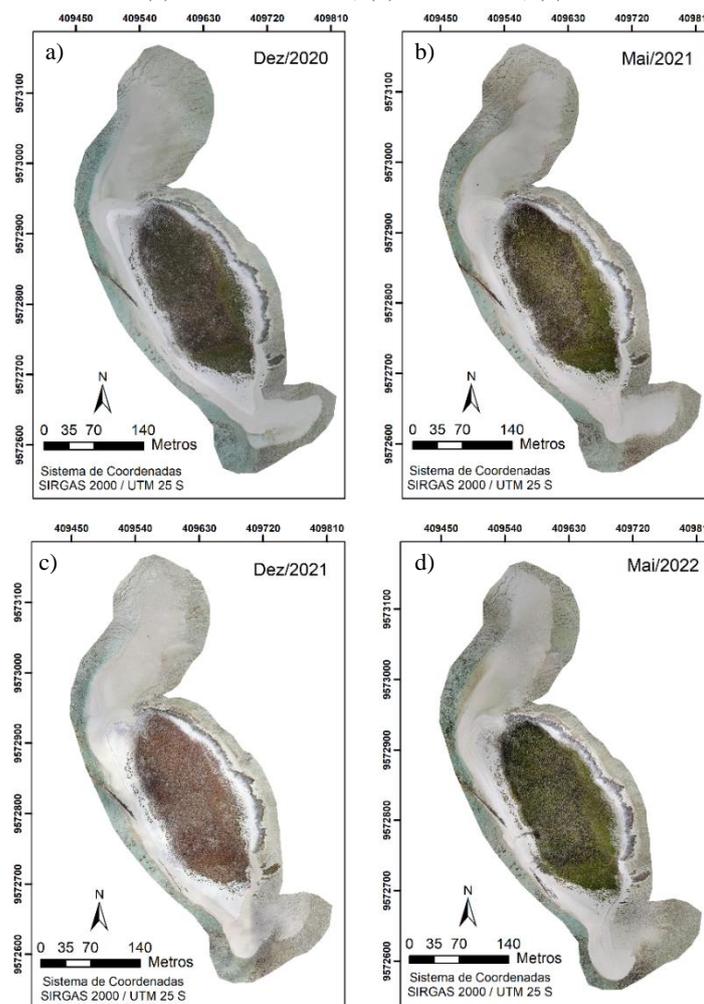
Tabela 2. Área da Ilha do Cemitério nos respectivos meses estudados.

Data	Área (m ²)	Área vegetada (m ²)
Dez/2020	67311,06	27742,89
Mai/2021	67608,42	27670,17
Dez/2021	64369,19	27649,16
Mai/2022	66042,62	28438,98

Varição na Posição da Linha de Costa

A Figura 17 apresenta os ortomosaicos da Ilha do Cemitério obtidos a partir das imagens capturadas pelo RPAS durante as quatro expedições realizadas.

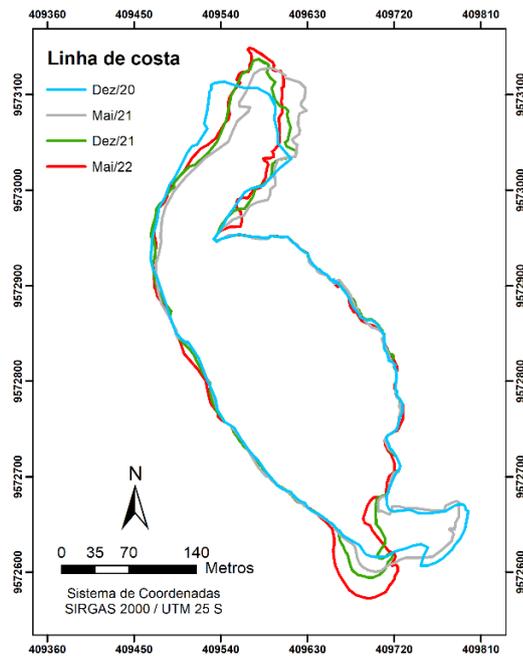
Figura 15 Ortomosaicos da Ilha do Cemitério obtidos a partir das imagens capturadas pelo RPAS durante as quatro expedições realizadas. (a) Dezembro/2020; (b) Maio/2021; (c) Dezembro/2021; (d) Maio/2022.



Fonte: A autora, 2023

A partir dos ortomosaicos foram delimitadas as posições da linha de costa (Figura 18) utilizando como indicador a base do recife. É possível observar que, de modo geral, não houve grande variação na posição da linha de costa durante o período estudado, exceto nas extremidades da ilha, que compreendem regiões mais dinâmicas.

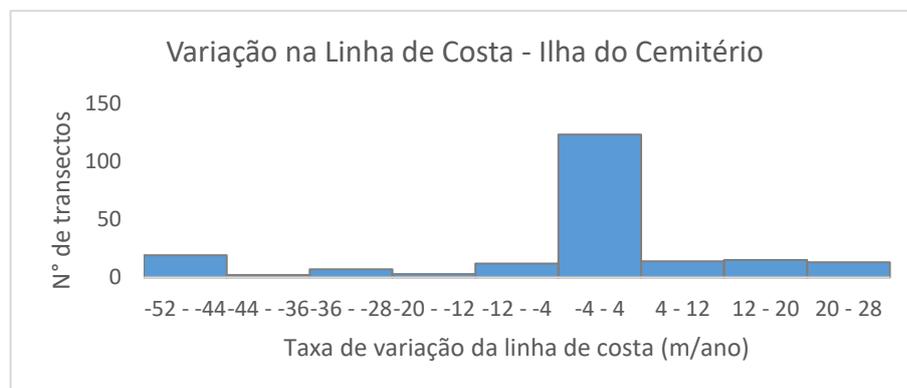
Figura 16. Posição da linha de costa da Ilha do Farol durante os quatro meses analisados.



Fonte: A autora, 2023

Através da ferramenta DSAS foi possível verificar que a maior parte da ilha apresentou uma variação de linha de costa entre -4 e +4 metros entre 2020 e 2022 (Figura 19). Considerando todos os 207 transectos realizados no perímetro da ilha, 102 deles apresentaram valores negativos para as taxas de variação de linha de costa (erosão) e 105 apresentaram valores positivos (progradação).

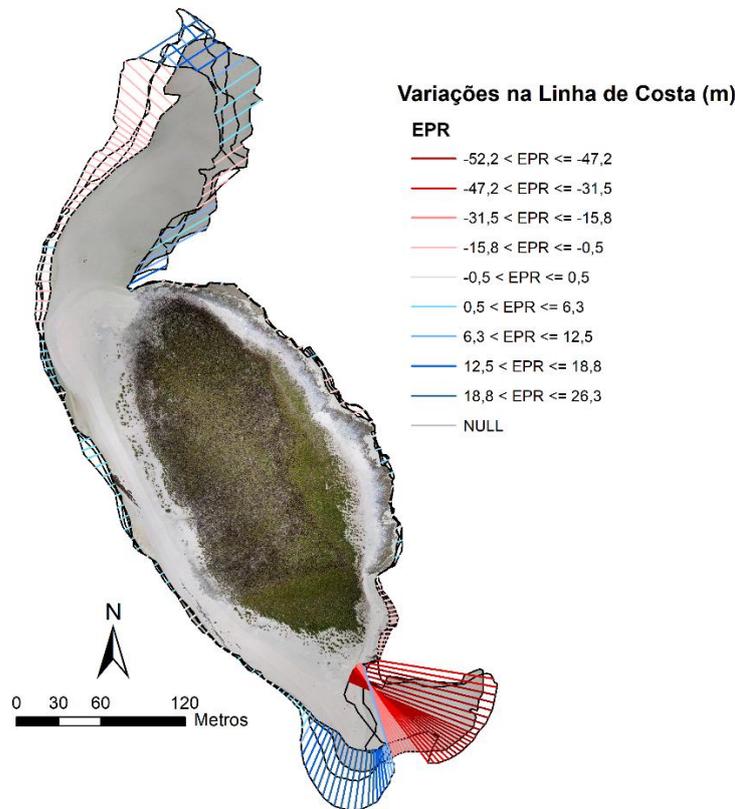
Figura 17 - Taxa de variação da linha de costa na Ilha do Cemitério durante o período analisado.



Fonte: A autora, 2023

A Figura 20 apresenta as taxas de variações na linha de costa da Ilha do Cemitério obtidas através do método estatístico EPR (End Point Rate) utilizando a ferramenta DSAS do ArcGIS. A maior retração da linha de costa foi de -52,2 metros e a maior progradação foi de +26,3 metros. Assim como na Ilha do Farol, as maiores variações da linha de costa, tanto negativas como positivas, foram detectadas nas extremidades da ilha, especialmente na porção sul. É possível verificar uma breve rotação no sentido horário nessas pontas.

Figura 20 - Variações na linha de costa da Ilha do Cemitério. Transectos em tons de vermelho indicam que houve retração na linha de costa e transectos em tons de azul indicam progradação (2020-2022).

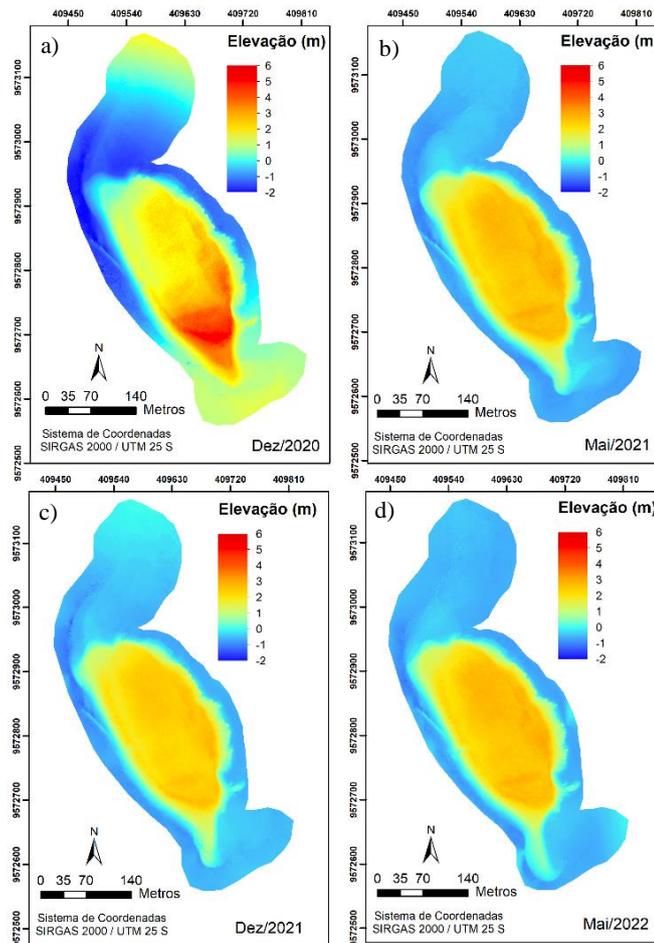


Fonte: A autora, 2023

Variações Volumétricas – Ilha do Cemitério

A Figura 21 apresenta os MDTs gerados para cada período de levantamento. O RMSE (Erro Quadrático Médio) com relação ao eixo Z variou de 1,01 a 18,90 cm ($6,3 \pm 8,5$). É possível verificar que no mês de Dezembro/2020 houve um maior acúmulo de sedimentos em comparação aos outros períodos de levantamento, resultando em uma maior elevação na topografia da ilha.

Figura 18 - Modelos Digitais de Terreno da Ilha do Cemitério. (a) Dezembro/2020; (b) Maio/2021; (c) Dezembro/2021; (d) Maio/2022



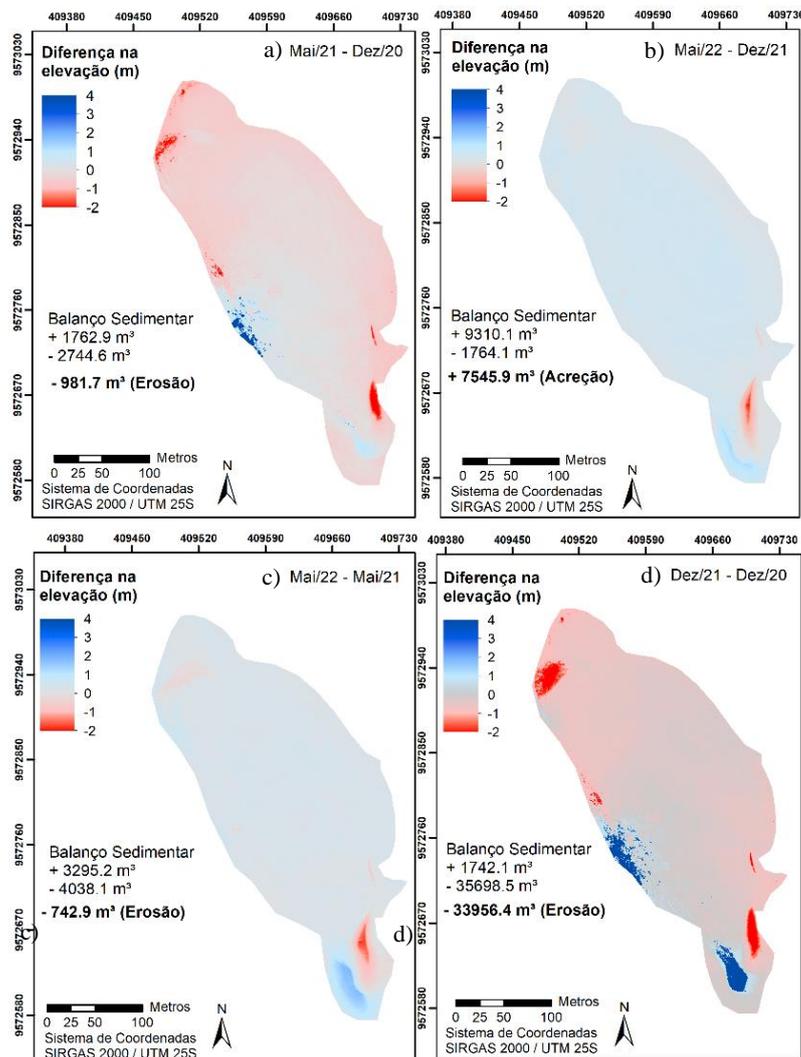
Fonte: A autora, 2023

Não foi verificado um padrão com relação à variação volumétrica sazonal: comparando os dois meses estudados (maio e dezembro) foi registrado um balanço sedimentar negativo no primeiro ano de levantamento e um balanço sedimentar positivo no segundo ano de levantamento (Figura 22).

A maior perda de sedimentos na Ilha do Cemitério foi registrada entre dezembro de 2020 e dezembro de 2021 (-33956.4 m³). Excetuando a comparação entre dezembro de 2021 e maio de 2022, o predomínio nesta ilha foi de erosão. Comparando com o balanço sedimentar da Ilha do Farol, é possível verificar que as variações volumétricas na Ilha do Cemitério foram menores, ou seja, indicaram uma maior estabilidade a curto prazo. Alguns estudos afirmam que o tamanho da ilha interfere nas variações morfológicas, sugerindo que ilhas de menor tamanho tendem a ser mais dinâmicas e apresentar maiores níveis de erosão enquanto que ilhas maiores tendem a apresentar mais estabilidade (MCLEAN e KENCH, 2015; DUVAT, 2018). SENGUPTA et al. (2020) também verificaram que ilhas menores são mais dinâmicas, mas elas

foram predominantemente caracterizadas por processos de acreção. No presente estudo, a ilha do Farol é maior que a Ilha do Cemitério, e apesar das variações planimétricas terem sido similares, as variações volumétricas da Ilha do Cemitério foram, em geral, menores. Assim como na Ilha do Farol, as maiores diferenças na elevação da Ilha do Cemitério foram detectadas nas extremidades, especialmente na porção sul.

Figura 22 - Diferença na elevação (m) e Balanço Sedimentar (m^3) na Ilha do Cemitério entre (a) Dezembro de 2020 e Maio de 2021; (b) Dezembro de 2021 e Maio de 2022; (c) Maio de 2021 e Maio de 2022 (d) Dezembro de 2020 e Dezembro de 2021.



Fonte: A autora, 2023

Uma das importâncias da caracterização dos aspectos morfológicos das ilhas recifais, incluindo área, volume e elevação, é sua influência na sensibilidade dessas ilhas aos impactos das mudanças ambientais globais. BONESSO et al. (2020) utilizaram indicadores morfométricos de ilhas recifais para gerar um Índice de Sensibilidade de Características das

ilhas recifais (ISCi). Os autores avaliaram a sensibilidade geomorfológica dessas ilhas às mudanças nas condições meteoceanográficas, onde um baixo ISCi (grandes áreas e volumes, altas elevações e menos regiões escarpadas) indica ilhas estáveis e menos suscetíveis aos impactos das mudanças climáticas e um alto ISC (pequenas áreas e volumes, baixas elevações e mais regiões escarpadas) indica ilhas instáveis e mais suscetíveis aos impactos das mudanças climáticas. No caso do Atol das Rocas, a Ilha do Farol, possuindo maior área e maior elevação em comparação à Ilha do Cemitério, apresentaria uma menor sensibilidade. Entretanto, a Ilha do Farol é caracterizada pela presença da Baía da Lama, um fator adicional que pode contribuir para uma maior vulnerabilidade desta ilha à inundação e erosão. Portanto, juntamente com outras características locais (ex. modelo de evolução da ilha, produtividade/saúde da plataforma recifal, suprimento de sedimentos) e fatores ambientais (por exemplo, condições de onda) (BONESSO et al., 2020), aspectos como a presença de feições de baixa elevação (depressão central) e sua respectiva dinâmica devem ser considerados em estudos de variações geomorfológicas em ilhas recifais, sobretudo quando associados à vulnerabilidade aos efeitos das mudanças climáticas.

CONCLUSÃO

Esse estudo identificou as regiões das ilhas do Atol das Rocas que apresentam maior dinâmica sedimentar, estando essas situadas principalmente nas extremidades de ambas as ilhas. Apesar das taxas de variação da linha de costa terem sido elevadas, as quantificações dos recuos e progradações foram similares e, portanto, sugerem um equilíbrio sedimentar a curto prazo. Os resultados corroboram com outros trabalhos já realizados no local.

Além das extremidades das ilhas, outra região que merece destaque encontra-se na porção nordeste da ilha do Farol e está associada não apenas às ondas, marés e correntes que adentram pela laguna, mas à dinâmica da baía da lama. Neste ponto, a predominância de erosão verificada tanto pelo balanço sedimentar negativo em termos volumétricos, como pelas taxas de recuo da linha de costa durante o período estudado, alerta para uma possível conexão da baía da lama com a laguna, o que poderia segmentar a ilha do Farol em duas ilhas menores no futuro. Além disso, o recuo da linha de costa também foi verificado considerando dados mais antigos (de 17 anos atrás), onde houve grande perda de sedimentos e de vegetação até os dias atuais. Os resultados ressaltam a influência da baía da lama na estabilidade geomorfológica da Ilha do Farol e indicam que o monitoramento para identificar as alterações nesta depressão central a longo prazo (migração, bifurcações, expansão/estreitamento) são considerados de extrema

importância. Esse tipo de análise pode contribuir para a compreensão das variações geomorfológicas de ilhas recifais que contenham esta feição (depressão central) em outras regiões do mundo.

Com relação às análises sazonais na Ilha do Farol, o mês de dezembro foi caracterizado pelo predomínio de erosão, em que as ilhas apresentaram menor área total e um balanço sedimentar negativo, e o mês de maio foi caracterizado por acreção, com as ilhas apresentando uma área maior e balanço sedimentar positivo. Condições hidrodinâmicas offshore distintas entre esses dois períodos podem ter contribuído para as variações morfológicas detectadas.

Em uma escala decadal, comparando com um estudo geomorfológico mais antigo realizado na região, apesar da área total da ilha do Farol (delimitada pela linha da base do recife) ter aumentado nos últimos 10 anos, a área emersa (delimitada pela linha de vegetação) sofreu uma redução de aproximadamente 46,7%. Essa diferença no resultado demonstra a importância de padronizar o indicador de linha de costa ao se trabalhar com análises relacionadas ao monitoramento costeiro. Além disso, destaca a necessidade de se trabalhar com diferentes escalas temporais para melhor compreensão das variações geomorfológicas atuantes, já que em curto prazo houve um aumento na área emersa da ilha e a longo prazo houve uma redução.

Comparando o primeiro ano de levantamento com o segundo, considerando o mesmo mês como referência (dez/20 com dez/21 e mai/21 com mai/22), ou seja, sem considerar alterações sazonais, foi verificado um balanço sedimentar negativo tanto na ilha do Farol como na Ilha do Cemitério. No entanto, o mesmo não foi verificado para as alterações do tamanho da ilha. Esse resultado reforça que nem sempre as variações planimétricas seguem o mesmo padrão das variações volumétricas e ressalta a necessidade de analisar as duas modalidades para compreender a dinâmica sedimentar.

Apesar de haver uma predominância de equilíbrio e resiliência às mudanças climáticas, o compilado de trabalhos citados neste estudo mostra que não existe um consenso geral quanto ao padrão de dinâmica sedimentar em ambientes insulares, ressaltando a particularidade de cada região. Vários parâmetros podem influenciar no comportamento morfológico de ilhas recifais, destacando-se a dinâmica de ondas, nível do mar, eventos meteorológicos (como o El Niño), formato da ilha e do recife adjacente, bem como a saúde do ecossistema recifal, que é a fonte do sedimento que compõe essas ilhas. Como tecnologia moderna, prática e eficiente, o presente estudo reforça a aplicação de RPAS e técnicas de geoprocessamento para analisar variações morfológicas planimétricas e volumétricas, sobretudo em ambientes remotos. Nesse contexto,

a ausência praticamente total de vegetação arbórea nas ilhas recifais estudadas permitiu bons resultados a partir das imagens capturadas por RPAS.

REFERÊNCIAS

- Araújo, R. V., Pereira, P. S., Lino, A. P., Araújo, T. M., & Gonçalves, R. M. (2021). Morphodynamic study of sandy beaches in a tropical tidal inlet using RPAS. *Marine Geology*, 438, 106540.
- Aslam, M., & Kench, P. S. (2017). Reef island dynamics and mechanisms of change in Huvadho Atoll, Republic of Maldives, Indian Ocean. *Anthropocene*, 18, 57-68.
- Barnett, J. (2005). Titanic states? Impacts and responses to climate change in the Pacific Islands. *Journal of International Affairs*, 203-219.
- BEETHAM, E., KENCH, P. S., & POPINET, S. Future reef growth can mitigate physical impacts of sea-level rise on atoll islands. *Earth's Future*, 5(10), 1002-1014, 2017.
- BELLINI, C., MARCOVALDI, M. A., SANCHES, T. M., GROSSMAN, A., & SALES, G. Atol das Rocas biological reserve: second largest Chelonia rookery in Brazil. *Marine Turtle Newsletter*, 72(1), 1-2, 1996.
- Connell, J. (2013). *Islands at risk?: environments, economies and contemporary change*. Edward Elgar Publishing.
- COSTA, M. B., MACEDO, E. C., & SIEGLE, E. Planimetric and volumetric changes of reef islands in response to wave conditions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(15), 2663-2678, 2017.
- COSTA, M. B., MACEDO, E. C., & SIEGLE, E. Wave refraction and reef island stability under rising sea level. *Global and Planetary Change*, 172, 256-267, 2019.
- Dawson, J. L. (2021). Multi-decadal shoreline morphodynamics of a shelf-edge reef island, Great Barrier Reef: Implications for future island persistence. *Geomorphology*, 392, 107920.
- Dickinson, W. R. (1999). Holocene sea-level record on Funafuti and potential impact of global warming on central Pacific atolls. *Quaternary Research*, 51(2), 124-132.
- Flood, P. (2011). *Cay formation*. Springer, Dordrecht, The Netherlands.
- Ford, M.R., Kench, P.S., 2016. Spatiotemporal variability of typhoon impacts and relaxation intervals on Jaluit Atoll, Marshall Islands. *Geology* 44, 159–162.
- GABRLIK, P., COUR-HARBO, A. L., KALVODOVA, P., ZALUD, L., & JANATA, P. Calibration and accuracy assessment in a direct georeferencing system for UAS photogrammetry. *International Journal of Remote Sensing*, 39(15-16), 4931-4959, 2018.
- Genz, A. S., Fletcher, C. H., Dunn, R. A., Frazer, L. N., & Rooney, J. J. (2007). The predictive accuracy of shoreline change rate methods and alongshore beach variation on Maui, Hawaii. *Journal of Coastal Research*, 23(1), 87-105.
- Gonçalves, R. M., Holanda, T. F., Queiroz, H. A. A., Sousa, P. H. G. D. O., & Pereira, P. S. (2022). Exploring RPAS potentiality using a RGB camera to understand short term variation on sandy beaches. *Catena*, 210, 105949.
- HATFIELD, J. S., REYNOLDS, M. H., SEAVY, N. E., & KRAUSE, C. M. Population dynamics of Hawaiian seabird colonies vulnerable to sea-level rise. *Conservation Biology*, 26(4), 667-678, 2012.
- IPCC, 2019: Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M.Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A.Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. No prelo.
- Kench, P.S., Thompson, D., Ford, M.R., Ogawa, H., McLean, R.F., 2015. Coral islands defy sea-level rise over the past century: Records from a central Pacific atoll. *Geology*

- KENCH, P. S., & BRANDER, R. W. Response of reef island shorelines to seasonal climate oscillations: South Maalhosmadulu atoll, Maldives. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 111(F1), 2006.
- KENCH, P.S. & COWELL, P.J. The Morphological Response of Atoll Islands to Sea-Level Rise. Part 2: Application of the Modified Shoreface Translation Model. *Journal of Coastal Research Special Issue* 34, 2001
- Kench, P. S., & Mann, T. (2017). Reef island evolution and dynamics: Insights from the Indian and Pacific oceans and perspectives for the Spermonde Archipelago. *Frontiers in Marine Science*, 4, 145.
- Klepp, S. (2014). "Small island states and the new climate change movement: the case of Kiribati," in *Routledge Handbook of the Climate Change Movement*, eds M. Dietz and H. Garrelts (London, New York: Routledge), 308–319.
- Laporte-Fauret, Q., Marieu, V., Castelle, B., Michalet, R., Bujan, S., & Rosebery, D. (2019). Low-cost UAV for high-resolution and large-scale coastal dune change monitoring using photogrammetry. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(3), 63.
- Lowe, M. K., Adnan, F. A. F., Hamylton, S. M., Carvalho, R. C., & Woodroffe, C. D. (2019). Assessing reef-island shoreline change using UAV-derived orthomosaics and digital surface models. *Drones*, 3(2), 44.
- McAdam, J. (Ed.). (2010). *Climate change and displacement: Multidisciplinary perspectives*. Bloomsbury Publishing.
- McLean, R., & Kench, P. (2015). Destruction or persistence of coral atoll islands in the face of 20th and 21st century sea-level rise?. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 6(5), 445-463.
- McLean, R. F., Holthus, P. F., Hosking, P. L., & Woodroffe, C. D. (1991). Tuvalu Land Resources Survey: Nanumaga. Nurse, L. A., McLean, R. F., Agard, J., Briguglio, L. P., Duvat-Magnan, V., Pelesikoti, N., ... & Webb, A. (2014). Small islands.
- Mycoo, M., M.Wairiu, D. Campbell, V. Duvat, Y. Golbuu, S. Maharaj, J. Nalau, P. Nunn, J. Pinnegar, and O.Warrick, 2022: Small Islands. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2043–2121, doi:10.1017/9781009325844.017.
- PERRY, C. T., ALVAREZ-FILIP, L., GRAHAM, N. A., MUMBY, P. J., WILSON, S. K., KENCH, P. S., ... & JANUCHOWSKI-HARTLEY, F. Loss of coral reef growth capacity to track future increases in sea level. *Nature*, 558(7710), 396-400, 2018.
- SHOPE, J. B., STORLAZZI, C. D., & HOEKE, R. K. Projected atoll shoreline and run-up changes in response to sea-level rise and varying large wave conditions at Wake and Midway Atolls, Northwestern Hawaiian Islands. *Geomorphology*, 295, 537-550, 2017.
- Stoddart, D. R., & Steers, J. A. (1977). The nature and origin of coral reef islands. *Biology and geology of coral reefs*, 4, 59-105.
- Stoddart, D. R. (1971). Coral reefs and islands and catastrophic storms. In *Applied coastal geomorphology* (pp. 155-197). Palgrave Macmillan, London.
- STORLAZZI, C. D., ELIAS, E. P., & BERKOWITZ, P. Many atolls may be uninhabitable within decades due to climate change. *Scientific reports*, 5, 2015.
- Talavera, L., Vila-Concejo, A., Webster, J. M., Smith, C., Duce, S., Fellowes, T. E., ... & Hacker, J. (2021). Morphodynamic Controls for Growth and Evolution of a Rubble Coral Island. *Remote Sensing*, 13(8), 1582.
- Woodroffe, C. D., & McLean, R. F. (1994). Reef islands of the Cocos (Keeling) islands. *Atoll Research Bulletin*.
- Woodroffe, C. D., McLean, R. F., Smithers, S. G., & Lawson, E. M. (1999). Atoll reef-island formation and response to sea-level change: West Island, Cocos (Keeling) Islands. *Marine Geology*, 160(1-2), 85-104.
- WOODROFFE, C. D. Reef-island topography and the vulnerability of atolls to sea-level rise. *Global and Planetary Change*, 62(1-2), 77-96, 2008.

Woodroffe, C. D., & Morrison, R. J. (2001). Reef-island accretion and soil development on Makin, Kiribati, central Pacific. *Catena*, 44(4), 245-261.

Woodroffe, C. D., Samosorn, B., Hua, Q., & Hart, D. E. (2007). Incremental accretion of a sandy reef island over the past 3000 years indicated by component-specific radiocarbon dating. *Geophysical Research Letters*, 34(3).

YAMANO, H., KAYANNE, H., & CHIKAMORI, M. An overview of the nature and dynamics of reef islands. *Global Environmental Research-English Edition-*, 9(1), 2005.

Yamano, H., Kayanne, H., Yamaguchi, T., Kuwahara, Y., Yokoki, H., Shimazaki, H., & Chikamori, M. (2007). Atoll island vulnerability to flooding and inundation revealed by historical reconstruction: Fongafale Islet, Funafuti Atoll, Tuvalu. *Global and Planetary Change*, 57(3-4), 407-416.

3 ARTIGO 2 – ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL E DENSIDADE DE AVES MARINHAS (ANOUS STOLIDUS E ONYCHOPRION FUSCATUS) NA COLÔNIA REPRODUTIVA DE UMA ILHA RECIFAL ATRAVÉS DE RPAS

RESUMO

Apesar do importante papel ecológico, aves marinhas compõem um dos grupos de vertebrados mais ameaçados. Pesca incidental, poluição, sobrepesca, espécies exóticas invasoras e mudanças climáticas constituem algumas das ameaças. Com relação a esta última, os impactos não são apenas diretamente às aves marinhas, mas também a ambientes fundamentais para a reprodução desses animais, como ilhas recifais que abrigam colônias reprodutivas. Aumento do nível do mar, acidificação oceânica, aumento da temperatura superficial do mar e intensificação de eventos extremos podem contribuir para processos erosivos em ilhas recifais, interferindo no habitat de nidificação de diversas espécies. A quantificação de aves em colônias reprodutivas é considerada a forma mais confiável de monitorar as tendências populacionais. O objetivo deste estudo foi analisar a densidade e distribuição espaço-temporal de *Anous stolidus* e *Onychoprion fuscatus* na colônia reprodutiva da Ilha do Farol, inserida no Atol das Rocas, através de RPAS. Foram analisados ortomosaicos e MDTs elaborados a partir das imagens capturadas pelo RPAS. Foram analisadas características da vegetação, variações geomorfológicas da ilha e potencial influência na densidade e distribuição de aves. A contagem de aves foi realizada através de amostragem, sendo quantificado manualmente o número de aves em 14 quadrados de 100m² e posteriormente o valor foi extrapolado para a área total do ninhal. Adicionalmente, foi testado um método de contagem utilizando Análise de Imagem Baseada em Objeto. Os resultados indicaram uma preferência para ambas as espécies por nidificar nas regiões caracterizadas por vegetação mais densa composta por *Cyperus* sp. e *P. oleracea*, situada especialmente nas porções centrais da ilha. Apesar dessas regiões terem apresentado uma estabilidade geomorfológica a curto prazo, elas possuem baixa elevação e estão situadas nas proximidades de uma depressão central dinâmica, contribuindo para a vulnerabilidade dos ninhos a eventos erosivos e de inundação associados a esta feição, sobretudo a médio e longo prazo. Áreas desprovidas de vegetação praticamente não são utilizadas para nidificação, à exceção de poucos ninhos registrados de *O. fuscatus*. Já as áreas vegetadas por *S. portulacastrum* são predominantemente utilizadas por *A. stolidus*. O maior número de aves foi registrado em maio/2022 (N= 115.360). Em comparação ao mesmo mês no

ano anterior (N=9.939), houve diferença significativa, sugerindo a inexistência de uma sazonalidade anual determinante na nidificação. O RPAS se mostrou uma ferramenta eficiente para a análise da densidade e distribuição espacial das aves, além de permitir a obtenção de informações associadas às variações geomorfológicas da ilha que interferem na ocupação do ninhal. O armazenamento das imagens aéreas capturadas permite a criação de um banco de dados geoespaciais que deve ser utilizado como referência para comparações futuras e detectar possíveis flutuações populacionais ou alterações com relação aos padrões de distribuição das aves. O estudo destaca a importância de monitoramentos que integrem aspectos geomorfológicos de ilhas recifais com aspectos ecológicos associados à nidificação de aves marinhas. Essa integração é fundamental para identificar impactos ambientais e podem servir de subsídio para a criação de estratégias conservacionistas, sobretudo considerando mudanças climáticas e outras ameaças a esse grupo de animais e seus habitats de nidificação.

Palavras-chave: monitoramento; Sooty Tern; Brown Noddy; geomorfologia; erosão; ambientes insulares.

ABSTRACT

Despite their important ecological role, seabirds are one of the most endangered groups of vertebrates. Incidental fishing, pollution, overfishing, invasive alien species and climate change are some of the threats. With regard to the latter, the impacts are not only directly on seabirds, but also on key environments for the reproduction of these animals, such as reef islands that are home to reproductive colonies. Sea level rise, oceanic acidification, increase in sea surface temperature and intensification of extreme events can contribute to erosion processes on reef islands, interfering with the nesting habitat of several species. Quantification of birds in breeding colonies is considered the most reliable way to monitor population trends. The objective of this study was to analyze the density and space-time distribution of *Anous stolidus* and *Onychoprion fuscatus* in the breeding colony of Ilha do Farol, inserted in Atol das Rocas, using RPAS. Orthomosaics and MDTs elaborated from the images captured by RPAS were analyzed. Vegetation characteristics, geomorphological variations of the island and potential influence on the density and distribution of birds were analyzed. The bird count was carried out through sampling, manually quantifying the number of birds in 14 squares of 100m² and later the value was extrapolated to the total area of the nest. Additionally, a counting method using Object-Based Image Analysis was tested. The results indicated a preference for both species to nest in regions characterized by denser vegetation composed of *Cyperus* sp. and *P. oleracea*,

located especially in the central parts of the island. Although these regions have shown geomorphological stability in the short term, they have low elevation and are located close to a dynamic central depression, contributing to the vulnerability of nests to erosion and flooding events associated with this feature, especially in the medium and long term. Areas devoid of vegetation are practically not used for nesting, with the exception of a few recorded nests of *O. fuscatus*. The areas vegetated by *S. portulacastrum* are predominantly used by *A. stolidus*. The highest number of birds was recorded in May/2022 (N= 115,360). Compared to the same month in the previous year (N=9,939), there was a significant difference, suggesting the lack of an annual seasonality that determines nesting. The RPAS proved to be an efficient tool for analyzing the density and spatial distribution of birds, in addition to allowing the obtaining of information associated with the island's geomorphological variations that interfere with nesting occupation. The storage of captured aerial images allows the creation of a geospatial database that should be used as a reference for future comparisons and to detect possible population fluctuations or alterations in relation to the birds' distribution patterns. The study highlights the importance of monitoring that integrates geomorphological aspects of reef islands with ecological aspects associated with the nesting of seabirds. This integration is essential to identify environmental impacts and can serve as a basis for the creation of conservationist strategies, especially considering climate change and other threats to this group of animals and their nesting habitats.

Keywords: monitoring; Sooty Tern; Brown Noddy; geomorphology; erosion; island environments.

INTRODUÇÃO

As aves marinhas são aquelas que dependem de recursos marinhos para sobreviver. Por dependerem de tais recursos são reconhecidas como sentinelas da qualidade ambiental marinha, e flutuações em suas populações podem ser utilizadas para detectar, por exemplo, alterações na produtividade do oceano e, portanto, mensurar impactos ambientais (Croxall et al., 2002; Furness, 2012; Diamond e Devlin, 2003). Outras características como alta longevidade; ampla distribuição; elevada posição trófica; reprodução na forma de colônias e em locais determinados, permitindo a realização de censos populacionais; boa visibilidade e identificação relativamente fácil, também contribuem para a utilização desses organismos no monitoramento da saúde de ecossistemas marinhos (Parsons et al., 2008; Piatt et al., 2007; Einoder, 2009). Adicionalmente, outra importante função ecológica está associada ao fato de que essas aves

influenciam no ciclo biogeoquímico de nutrientes, sobretudo nitrogênio e fósforo, que são obtidos na área de forrageio no oceano e posteriormente transportados para regiões terrestres, praias, insulares, recifais e polares, onde são depositados através de seus excrementos (guano). Sendo assim, as aves marinhas são consideradas fertilizantes naturais, contribuindo na produtividade de diversos ecossistemas, especialmente em ambientes insulares, onde formam colônias reprodutivas, e nos recifes de coral adjacentes (Wait et al., 2005; Wainright et al., 1998).

Apesar do importante papel ecológico desempenhado, as aves marinhas compõem o grupo de aves mais ameaçado. Globalmente, cerca de 28% das espécies encontram-se ameaçadas de extinção, sendo as pelágicas as mais representadas nessa classificação. O declínio na população de aves marinhas está associado a diversos fatores, dentre os quais se destacam a pesca incidental (*bycatch*), poluição, sobrepesca, espécies exóticas invasoras e mudanças climáticas. No entanto, muitas espécies de aves ainda não possuem dados suficientes para avaliar seus respectivos status de conservação (Dias et al., 2019; Croxall et al., 2012; Paleczny et al., 2012; Phillips et al., 2016). Nesse contexto, há uma necessidade urgente da obtenção de dados associados ao padrão de distribuição espacial e densidade populacional para avaliar tendências ao longo do tempo e inferir adequadamente o status de conservação de espécies e populações ainda não avaliadas.

As ilhas recifais são fundamentais para a reprodução de diversas espécies de aves marinhas, sendo utilizadas como habitat de nidificação. No entanto, a vulnerabilidade desses animais com relação às mudanças climáticas e outras ameaças antrópicas permanece mal caracterizada (Berr et al., 2023). A escassez de estudos associados a aves marinhas em ilhas recifais restringem atualmente a capacidade dos gestores e pesquisadores de identificar espécies dependentes desses ambientes; avaliar a sua dinâmica espaço-temporal; mapear os riscos atuais e futuros; e priorizar alvos de conservação no desenvolvimento de políticas ambientais (Berr et al., 2023).

Várias abordagens para quantificar populações têm sido utilizadas, incluindo contagens no mar (Woehler, 1996) e contagens em ilhas de nidificação, sendo esta última considerada a forma mais confiável de monitorar as tendências populacionais de aves marinhas (Hutchinson 1980, Bibby et al. 1998). Em geral, as ilhas recifais são áreas remotas e, conseqüentemente, possuem diversos obstáculos com relação às metodologias tradicionalmente empregadas: dificuldades de acesso e logística operacional, distúrbios nos habitats naturais e na população estudada, coletas temporalmente e economicamente dispendiosas, além da baixa resolução

espacial dos dados, que resultam em elevadas margens de erro (Carey, 2009; Frederick et al., 2003; Sutherland, 2008). Atualmente, com os avanços tecnológicos, uma alternativa de metodologia vem sendo utilizada apresentando boa eficácia, podendo ser peça chave no monitoramento de colônias de aves marinhas em ilhas de nidificação: o uso de *Remotely Piloted Aircraft Systems* (RPAS) (Goebel et al., 2015; Brooke et al., 2015; Chabot & Bird, 2015; Koh & Wich, 2012; López & Mulero-Pázmány, 2019). Os RPAS são compostos por dispositivos aéreos controlados remotamente capazes de coletar imagens de alta resolução espacial, permitindo gerar um sistema de mapeamento regular para determinada área de estudo (Gabrlik et al., 2018). As vantagens adicionais dos levantamentos de imagens aéreas são que eles criam um registro permanente para referência futura ou reanálise e fornecem oportunidades únicas para investigar a ecologia espacial das aves e padrões de densidade, por exemplo (Edney e Wood, 2021; Chabot e Francis, 2016).

Através dessa ferramenta, Grenzdörffer (2013) quantifica uma colônia de gaivota-parda (*Larus canus*) na Ilha Langenwerder, reserva biológica da Alemanha; Ratcliffe et al. (2015) mostram que é possível capturar imagens de alta resolução de colônias de pinguins nas Ilhas Falkland e que a precisão do censo populacional por esse método é superior ao censo realizado através de observador no solo; Sardà-Palomera et al. (2011) monitoram variações temporais no tamanho da população reprodutora em uma colônia de gaivota-de-cabeça-preta (*Chroicocephalus ridibundus*) em uma ilha na Catalunha, Espanha; Goebel et al. (2015) realizam a contagem de ninhos de pinguins na Antártica, obtendo sua área e densidade populacional.

No Brasil, 14 espécies de aves marinhas nidificam em cinco ilhas oceânicas (Abrolhos, Fernando de Noronha, Arquipélago de São Pedro e São Paulo e Trindade/Martin Vaz e Atol das Rocas), estando 7 delas ameaçadas de extinção a nível nacional (Mancini et al., 2016). As ilhas recifais do Atol das Rocas, o único do Atlântico Sul, abrigam a maior colônia reprodutiva da viuvinha marrom (*Anous stolidus*) no Brasil e de trinta-réis (*Onychoprion fuscatus*) no Atlântico Sul (Schulz-Neto, 2004). Por outro lado, sabe-se que esses ambientes são geomorfologicamente dinâmicos e vulneráveis aos efeitos das mudanças climáticas, alertando para possíveis alterações nos habitats de nidificação destas aves marinhas (Hatfield et al., 2012; Kench & Cowell, 2001; Perry et al., 2018; Shope et al., 2017; Storlazzi et al., 2015).

Diante do exposto, e levando em consideração que o último censo no Atol foi realizado apenas na década de 90, o objetivo do presente estudo é analisar a densidade e distribuição espacial de *A. stolidus* e *O. fuscatus* em uma das ilhas inseridas no Atol (Ilha do Farol)

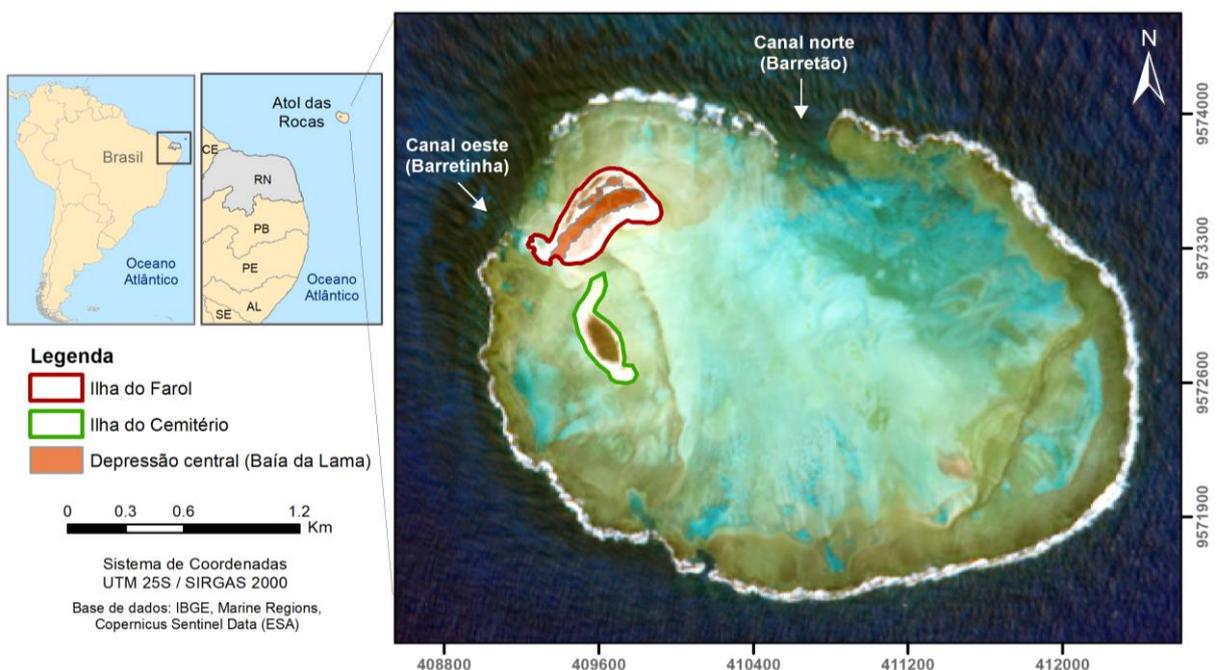
considerando dados obtidos entre 2020 e 2022 através de RPAS. O conhecimento do tamanho populacional e padrões de ocupação em colônias reprodutivas de aves marinhas pode contribuir para futuros monitoramentos, identificação de impactos ambientais e implantação de esforços voltados à conservação dessas espécies.

METODOLOGIA

Área de Estudo

O Atol das Rocas (Lat. 3,863°S; Long. 33,804°W) é um recife anelar elipsoidal composto predominantemente por algas coralíneas, com aproximadamente 3,5 km de comprimento (E-W) e 2,5 km de largura (N-S), situado a 250 km a nordeste da costa brasileira, no Atlântico Sul. A região compreende, dentre outras feições, uma laguna central, um banco de areia (Zulu) e duas ilhas, atualmente denominadas Ilha do Farol e Ilha do Cemitério (Fischer et al., 2007) (Figura 1).

Figura 1 - Área de estudo.



Fonte: A autora, 2023

Apesar da pequena dimensão, é extremamente relevante na manutenção da biodiversidade, podendo também ser utilizado como instrumento de monitoramento de mudanças climáticas globais (Fischer, 2007; MMA, 2010). Nas ilhas recifais inseridas no atol, nidificam 5 espécies de aves marinhas: Atobá-mascarado (*Sula dactylatra*), Atobá-marrom

(*Sula leucogaster*), Trinta-réis-das-rocas (*Onychoprion fuscatus*), Viuvinha-marrom (*Anous stolidus*) e Viuvinha-negra (*Anous minutus*). A colônia reprodutiva da viuvinha-marrom é a maior do Brasil, com uma população estimada em 27 mil aves, e a colônia do trinta-réis-das-rocas é a maior do Atlântico Sul (Schulz-Neto, 2004), onde contempla mais de 100 mil indivíduos. Em função do potencial ecológico, através do Decreto-Lei nº83.549/1979, o Atol das Rocas foi estabelecido como Reserva Biológica, sendo a primeira UC marinha do Brasil (Fischer et al., 2007; Soares et al., 2010).

Materiais, Coleta e Processamento de Dados

RPAS

Foram realizadas quatro expedições para a REBIO Atol das Rocas em um período de dois anos (Dez/2020, Mai/2021, Dez/2021 e Mai/2022). O plano de voo foi realizado através do aplicativo DroneDeploy, no qual foram definidos parâmetros como a altura do voo (100 m), a área a ser mapeada (Ilha do Farol e Ilha do Cemitério) e a sobreposição das imagens (75% frontal e 65% lateral). Durante as campanhas, visando aspectos de segurança dos equipamentos e qualidade dos dados, as condições meteorológicas locais foram sempre observadas, priorizando-se a execução dos mapeamentos em dias caracterizados pela ausência de chuvas e por ventos inferiores a 15 nós. Os mapeamentos foram realizados durante a baixa-mar, de acordo com a tábua de marés da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil, tendo como referência a Ilha de Fernando de Noronha localizada a aproximadamente 150 km da área de estudo. O *drone* utilizado foi o Mavic 2 Zoom desenvolvido pela DJI, cujas características compreendem: (i) tempo máximo de voo de até 31 minutos; (ii) distância máxima de voo de até 18 km; (iii) alcance de precisão de voo de até $\pm 0,1$ metros e $\pm 0,3$ metros na vertical e horizontal, respectivamente; (iv) capacidade de armazenamento que permite o registro de imagens em alta resolução (4K); (v) câmera com sensor CMOS e lentes com FOV de aproximadamente 83° (24 mm) (DJI, 2018).

As imagens coletadas com o RPAS foram processadas usando o *software Agisoft Metashape Professional versão 1.5.1*. As imagens foram ortorretificadas e georreferenciadas. A ortorretificação garante que o mosaico gerado seja representado em uma projeção ortogonal sem efeitos de perspectiva, eliminando deformações adquiridas em campo. O procedimento do processamento incluiu seis etapas principais: (i) adição das imagens capturadas e alinhamento. Nesta fase, o software procura pontos comuns nas fotografias e os combina, assim como encontra a posição da câmera para cada imagem e refina os parâmetros de calibração da câmera. Como resultado, uma nuvem de pontos esparsa e um conjunto de posições de câmera são

formados; (ii) importação dos pontos de controle (PCs) e adição dos pontos de checagem. Essa etapa foi realizada identificando os pontos homólogos entre os pontos de controle determinados em campo e os mesmos capturados pelas imagens baseadas em RPAS, manualmente, um a um, em cada imagem. Esse procedimento georreferencia as imagens capturadas e minimiza os erros horizontais e verticais dos produtos fotogramétricos; (iii) geração de uma nuvem de pontos densa, que é construída com base nas posições estimadas da câmera e nas próprias imagens; (iv) geração do Modelo Digital de Elevação (MDE); (v) transformação do MDE para o Modelo Digital de Terreno (MDT); e (vi) geração do ortomosaico.

Pontos de controle - GNSS

Os pontos de controle são utilizados durante o processo fotogramétrico e contribuem nas correções geométricas das imagens. São fundamentais para gerar ortomosaicos e Modelos Digitais de Terreno com qualidade planialtimétrica (mais informações em Gonçalves et al., 2022).

Nos levantamentos realizados foram utilizados 35 pontos de controle pré-sinalizados com dimensões de 40 x 40 cm. Estes foram distribuídos na Ilha do Farol (10 pontos posicionados no entorno do centro da ilha e 10 em sua porção praial) e na Ilha do Cemitério (5 pontos posicionados no entorno do centro da ilha e 10 em sua porção praial). Para a determinação das coordenadas tridimensionais dos pontos de controle foi utilizado um par de receptores GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) geodésicos de dupla frequência (L1/L2) captando sinais GPS e GLONASS.

O método de posicionamento empregado foi o pós-processamento relativo, sendo um receptor considerado como base, coletando dados brutos a partir de um ponto com coordenadas conhecidas, enquanto o outro, móvel, foi utilizado para determinar as coordenadas dos pontos de controle. Para os levantamentos foram definidos os seguintes parâmetros: tempo de ocupação de 2 minutos, taxa de gravação de 1s e máscara de elevação de 15°. As coordenadas obtidas no formato padrão GNSS foram pós-processados no software *Trimble® Business Center*, considerando o sistema geodésico de referência SIRGAS 2000 (datum oficial brasileiro) bem como o sistema de coordenadas UTM, fuso 25S.

Análises geomorfológicas em SIG

Os produtos gerados no *Agisoft Metashape Professional* (MDT e ortomosaico) foram exportados em formato *.TIFF* e importados como Raster no ArcGIS 10.6.1. As análises das variações geomorfológicas foram realizadas a partir do conjunto de amostras espaço-temporais obtidas. A linha de costa foi vetorizada utilizando como indicador a base do recife e a linha de vegetação (área vegetada). A partir disso, foi possível calcular a área total da ilha e a área vegetada através de operações na tabela de atributos (*Calculate Geometry*), bem como realizar análises planimétricas.

Com relação às análises volumétricas, foi calculada a diferença na elevação através da subtração entre MDTs gerados utilizando a ferramenta *Raster Calculator*. Por fim, o quantitativo referente ao balanço sedimentar foi calculado através da ferramenta *Cut Fill (3D Analyst)*, que calcula pixel a pixel a diferença entre o raster inicial e o final, permitindo comparar os MDTs e identificar onde houve ganho ou perda de volume sedimentar. Ao estudar variações volumétricas em ambientes praias, a ferramenta *Cut Fill* é utilizada para quantificar e interpretar visualmente as áreas que ganharam ou perderam sedimento. A medida volumétrica total do material ganho ou perdido pode ser calculada e verificada na Tabela de Atributos do raster (PEPE e COUTU, 2008; DAS ADHIKARI et al., 2016; JOSHUA et al., 2016; DAWSON e SMITHERS, 2010). Mais detalhes da ferramenta podem ser encontrados em ESRI (2021).

Marés

Os dados de amplitude de maré foram obtidos através do site da Marinha do Brasil (<https://www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare>), referentes ao período em que os mapeamentos foram realizados (dez/20, mai/21, dez/21 e mai/22).

Distribuição e densidade das aves marinhas

a) Amostragem por Quadrados

Observando que a ocupação das aves variava a partir do padrão de vegetação, utilizando o software ArcGIS foram plotados 14 quadrados de 100 m² cada (amostras) sobre os ortomosaicos gerados a partir das imagens capturadas pelo RPAS em cada expedição. As aves foram quantificadas manualmente em todos os quadrados. Adicionalmente, foram criados polígonos para cada tipo de vegetação presente na ilha e suas áreas foram quantificadas. Vale destacar que os quadrados foram distribuídos de modo a incluir as distintas espécies de vegetação presentes na área do ninhal. Em alguns casos, foi verificado que a ocupação de aves variava apesar de compreender o mesmo tipo de vegetação e, portanto, nessas situações foram

plotados mais de um quadrado e estimada a densidade média de aves. Por fim, a densidade estimada foi extrapolada para a área total do ninhal.

Uma vez que através dos ortomosaicos gerados pelas imagens capturadas pelo RPAS não foi possível distinguir as espécies estudadas (*A. stolidus* e *O. fuscatus*), foi realizado um levantamento na Ilha do Farol e foram feitos registros fotográficos em 5 quadrados de 4 m² cada com o celular. A partir das fotografias, foram contabilizadas manualmente as aves de cada espécie e obtida a respectiva proporção entre elas. Posteriormente, essa proporção foi extrapolada para a área total, obtendo o número total de *O. fuscatus* e *A. stolidus* para cada expedição.

b) Classificação supervisionada para quantificação de aves

O procedimento de classificação supervisionada das imagens (ortomosaicos) foi realizado no aplicativo eCognition Developer 8.6 e incluiu basicamente dois passos: segmentação multirresolução e classificação supervisionada. A classificação orientada a objetos se realiza sobre segmentos da imagem (objetos). Os objetos com características comuns são agrupados em classes, e as classes são organizadas em forma de rede hierárquica e semântica.

Inicialmente foi criada uma árvore de processos (*Process Tree*), onde o primeiro passo foi o processo de segmentação através do algoritmo *multiresolution segmentation*, o qual realiza o agrupamento de pixels com características espectrais semelhantes, analisando o tamanho, a homogeneidade espectral, a homogeneidade espacial e a forma do objeto (CHUBEY et al., 2006). Durante esse processo, os objetos foram gerados a partir de valores definidos, de acordo com a imagem e o objetivo do estudo, para os parâmetros forma (*shape*), compactidade (*compactness*) e escala. A escala é uma medida de heterogeneidade referente ao tamanho dos objetos e quanto maior seu valor, maior serão os objetos criados. Nesse caso, foi preciso definir um valor baixo para que as aves, consideradas um objeto relativamente pequeno, pudessem ser delimitadas apropriadamente. Ao atribuir um valor para o parâmetro forma (*shape*), estamos definindo o grau de influência (peso) que a forma do objeto possui no processo de segmentação em comparação a cor: um valor elevado indica que a forma é um parâmetro importante a ser considerado e um valor baixo atribui um maior peso na cor, que é baseada nas características espectrais (ou valores de *pixels*) da imagem, ao invés da forma. Ao atribuir um valor para o parâmetro compactidade (*compactness*), estamos definindo o grau de influência (peso) que a compactidade do objeto possui no processo de segmentação em comparação à suavidade: um valor baixo cria objetos mais alongados e com bordas suaves, enquanto que um valor alto

implica em objetos mais compactos e menores. Para os dois últimos parâmetros aplica-se peso de 0 a 1, podendo assim evidenciar mais entre a forma ou cor e entre a compactidade ou suavidade (BAATZ et al., 2008). Foram realizados vários testes até se obter uma definição apropriada dos valores dos parâmetros a serem utilizados na segmentação, sendo, por fim, adotados os seguintes valores: Escala = 10; Forma = 0,1 e Compactidade = 0,5.

Em seguida, foi realizada uma interpretação visual das imagens para definir quais as classes temáticas seriam importantes para o objetivo do estudo. Neste caso, apenas três foram consideradas: Solo exposto, Vegetação e Ave. Após a definição dessas classes, foi iniciada a etapa de coleta de amostras, em que amostras dos objetos foram classificadas manualmente para treinar o sistema (*Classification* → *Samples* → *Select Samples*). Para a execução da classificação supervisionada utilizou-se o algoritmo de vizinho mais próximo (*Nearest Neighbor*) – NN. O classificador NN é uma abordagem de classificação supervisionada baseada em distâncias euclidianas, em que para cada uma das classes, amostras de treinamento são localizadas e usadas para classificar todos os objetos restantes (desconhecidos) na imagem. A técnica utiliza a proximidade entre dados conhecidos e objetos não classificados para a realização de previsões.

Os resultados da classificação pelo *Ecognition* foram exportados no formato *shapefile* e importados no ArcGIS para a quantificação da classe-alvo (aves). Para cada ave detectada foi gerado um polígono e elas foram contabilizadas observando o número total de polígonos gerados, através da Tabela de Atributos. Para a avaliação da acurácia dos resultados e validação do método foi utilizada a ferramenta “Create Accuracy Assessment Points”, sendo criados 200 pontos de validação em cada setor. Nesses pontos, foi realizada uma classificação manual para comparar com a classificação gerada pelo *software*. Posteriormente, foram analisados os coeficientes de exatidão global e o Índice Kappa, gerados a partir de uma matriz de confusão. A matriz de confusão compara a relação entre os dados de referência conhecidos e os resultados correspondentes de uma classificação automatizada (Lillesand et al., 2004). Para conceituar os resultados obtidos pelo coeficiente Kappa, foram utilizados os intervalos pré-definidos por Landis & Koch (1977).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Variação na Distribuição de Aves Marinhas com Relação à Vegetação

O solo da Ilha do Farol é formado predominantemente por sedimentos biogênicos de composição calcária e fertilizado pelo guano das aves marinhas. Tais características, juntamente com a inexistência de água doce (excetuando a da chuva) e a alta exposição à maresia, condicionam a existência de plantas terrestres adaptadas a este ambiente hipersalino. À exceção de casuarinas e alguns coqueiros introduzidos, a vegetação compreende espécies herbáceas. A cobertura e o tipo de vegetação constituem um dos fatores que podem influenciar na seleção do local de nidificação pelas aves marinhas (Buckley e Buckley, 1980; Burger e Gochfeld, 1985; Fasola e Canova, 1991).

Os dados do presente estudo demonstraram que a distribuição e densidade do ninhal na ilha do Farol foi influenciada pelo padrão de vegetação, sendo verificada uma diferença estatisticamente significativa no n° de aves/m² considerando as distintas vegetações analisadas (Kruskal-Wallis, $p < 0,05$).

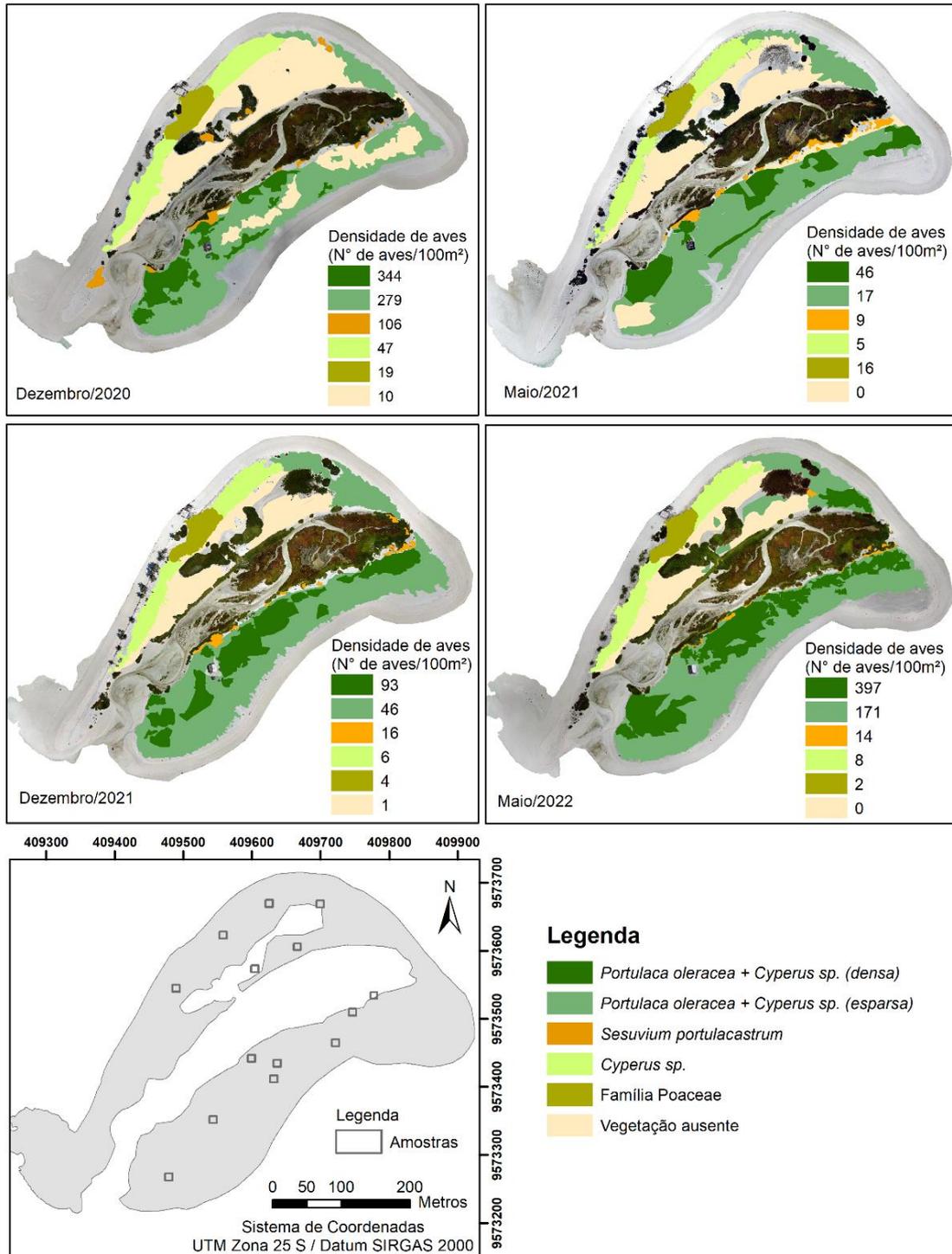
Essa diferença na densidade de aves com relação à vegetação foi registrada entre:

- (1) a vegetação densa, composta majoritariamente pelas famílias Cyperaceae (*Cyperus* sp.) e Portulacaceae (*Portulaca oleracea*), e a vegetação pertencente à família Poaceae (espécies em processo de identificação) (Mann-Whitney, $p < 0,05$). A vegetação densa ocupa predominantemente as regiões mais centrais da Ilha do Farol, enquanto que a vegetação que compreende espécies da família Poaceae encontra-se presente apenas nas imediações das ruínas do antigo farol e da casa do faroleiro;
- (2) entre a vegetação densa e as áreas sem vegetação (Mann-Whitney, $p < 0,05$);
- (3) entre a vegetação esparsa e as áreas sem vegetação (Mann-Whitney, $p < 0,05$). A vegetação esparsa, assim como a densa, é composta por *Cyperus* sp. e *Portulaca oleracea*, e está distribuída tanto nas regiões centrais da ilha do Farol como nas regiões mais periféricas.

Conforme demonstrado na Figura 2 e na Tabela 1, foi verificada uma preferência pela nidificação em áreas ocupadas pela vegetação densa em todas as temporadas analisadas. Vale destacar que a denominação “densa” utilizada neste estudo não se refere a uma vegetação alta e fechada, mas sim a gramíneas que se encontram mais concentradas com relação às áreas periféricas da ilha, onde neste último caso estão geralmente mais esparsadas. A vegetação densa fornece proteção contra predadores e condições de clima extremas (ventos fortes, chuvas e estresse térmico) (Wray e Whitmore 1979, Burger e Gochfeld, 1986; Saliva e Burger, 1989) e

isso explica a preferência por nidificar nestas áreas em comparação às áreas desprovidas de vegetação.

Figura 2 - Densidade de aves marinhas (*A. stolidus* e *O. fuscatus*) e caracterização da vegetação predominante na Ilha do Farol.



Fonte: A autora, 2023

Tabela 1 - Número total de aves marinhas (*A. stolidus* e *O. fuscatus*) considerando os diferentes tipos de vegetação na Ilha do Farol

Vegetação característica	N° de aves			
	Dezembro/2020	Mai/2021	Dezembro/2021	Mai/2022
Portulaca oleracea + Cyperus sp. (densa)	24278	4252	11315	64684
Portulaca oleracea + Cyperus sp. (esparsa)	69787	4830	14615	49980
Cyperus sp.	3718	333	386	562
Família Poaceae	548	394	107	51
Sesuvium portulacastrum	1808	129	160	85
Vegetação ausente	2364	0	112	0
SOMA	102503	9939	26695	115360

Fonte: A autora, 2023

A Figura 3 apresenta uma área dominada pela vegetação *Portulaca oleracea* (densa) ocupada por ninhos de *O. fuscatus* (em maior proporção) e *A. stolidus*.

Figura 3 - Predominância de *O. fuscatus* sobre vegetação caracterizada pela espécie *Portulaca oleracea* na Ilha do Farol



Fonte: A autora, 2023

Analisando colônias reprodutivas de *O. fuscatus* no arquipélago de Culebra (Porto Rico), Saliva e Burger (1989) também verificaram que as aves selecionam locais de nidificação sob densa cobertura vegetal e longe de áreas abertas. O mesmo padrão foi verificado por Burger e Gochfeld (1986) na Ilha Manana (Havaí).

A segunda preferência pelas aves na Ilha do Farol foi a nidificação em áreas ocupadas pela vegetação esparsa, também composta por *Cyperus* sp. (em maior proporção) e *P. oleracea* (Figura 2 e Tabela 1). Com relação a *Cyperus* sp., foi possível verificar que há uma predominância de *Anous stolidus* sobre os tufos desta vegetação, enquanto que a *Onycropion fuscatus* ocorre tanto sobre a vegetação ou diretamente no solo, em suas adjacências (Figura 4). Analisando colônias reprodutivas de *O. fuscatus* em ilhas de Seychelles com relação às características da vegetação, Feare et al. (1997) também verificou que a densidade de ninhos foi maior em áreas com vegetação esparsa (cobertura de vegetação de 30 a 50%), geralmente dominadas por *Portulaca oleracea*.

Figura 4 - Presença de *A. stolidus* e *O. fuscatus* sobre vegetação pertencente ao gênero *Cyperus* sp.



Fonte: A autora, 2023

A preferência por nidificar em áreas que compreendem vegetação composta por *Cyperus* sp. e *Portulaca oleracea* registrada neste estudo corrobora com os resultados encontrados na mesma região por Hazin e Macedo (2006) em 1997, demonstrando que o padrão de densidade de ninhos com relação à vegetação se manteve a longo prazo.

Nas áreas vegetadas por *Cyperus* sp. e espécies pertencentes à família Poaceae situadas na porção da ilha voltada ao oceano (noroeste, oeste e sudoeste da ilha), a densidade das aves estudadas foi reduzida (Figura 2) e praticamente restrita à *O. fuscatus*. Sugere-se que a presença

de potenciais predadores nesta região seja um dos fatores que justifiquem essa redução na ocupação, conforme será discutido posteriormente. Apesar da presença de *O. fuscatus* ilustrada na Figura 5, não foram registrados ninhos sobre o solo exposto, apenas poucos sobre a vegetação (Poaceae).

Figura 5 - Ocupação de *O. fuscatus* na área vegetada por espécies da família Poaceae. Foram registrados poucos ninhos, estando estes situados sobre a vegetação.



Fonte: A autora, 2023

Com relação à vegetação composta predominantemente por *Sesuvium portulacastrum*, situada especialmente nas margens da depressão central existente na ilha (Baía da Lama), a nidificação é menor (Figura 2 e Tabela 1) e praticamente restrita à *A. stolidus* (Figura 6). Ninhos de *O. fuscatus* já foram registrados em outras temporadas reprodutivas, mas são raros em comparação à primeira espécie citada. *S. portulacastrum* é uma planta halófito, que se adapta bem a ambientes de elevada salinidade e solos alagados (Lockhande et al., 2013). Neste caso, *A. stolidus* apresenta uma maior tolerância a áreas parcialmente alagadas em comparação a *O. fuscatus*.

Figura 6 - *A. stolidus* nidificando sobre vegetação nas margens da Baía da Lama



Fonte: A autora, 2023

Ainda conforme ilustrado na Figura 2 e descrito na Tabela 1, as áreas da ilha do Farol desprovidas de vegetação em geral não são priorizadas para nidificação, à exceção de alguns ninhos de *O. fuscatus* que foram detectados (Figura 7). Conforme mencionado anteriormente, a ausência de vegetação expõe os ovos a condições climáticas extremas e potencial predação, podendo prejudicar o sucesso reprodutivo. Sugere-se que *O. fuscatus* seja mais tolerante a estas condições em comparação a *A. stolidus*. Vale ressaltar que em maio, período chuvoso na região, não houve registro de ninhos em áreas desprovidas de vegetação em ambos os anos analisados.

Figura 7 - *O. fuscatus* nidificando em áreas desprovidas de vegetação



Fonte: A autora, 2023

Variação na Distribuição de Aves Marinhas com Relação à Potencial Predação

Um dos parâmetros que também influenciam na seleção do local de nidificação por aves marinhas está relacionado ao grau de exposição a predadores. A posição do ninho na colônia interfere na possibilidade de predação, com os ninhos do centro da colônia sendo considerados menos vulneráveis à predação do que aqueles da borda (FEARE, 1976; Hamilton, 1991; ANTAS et al., 2016). No caso da Ilha do Farol, esse fator também pode contribuir para uma maior ocupação de aves nas regiões mais centrais da ilha. Vale destacar que na região periférica situada no norte, noroeste, oeste e sudoeste da ilha (lado voltado para o oceano) a densidade de aves foi menor. Esta região é caracterizada pela presença do caranguejo *Johngarthia lagostoma* (Figura 8), um potencial predador de ovos e filhotes de *O. fuscatus* (Entringer Jr e Srbek-Araujo, 2023; Teixeira et al., 1991; Luigi et al. 2009, Schreiber et al. 2002). Apesar de estarem distribuídos na ilha como um todo, é nesta porção que os caranguejos desenvolvem suas tocas e são mais frequentes. SCHULZ-NETO (2004) verificou durante trabalhos de campo no Atol das Rocas ninhos e ovos de *O. fuscatus* e *A. stolidus* sendo predados pelo caranguejo supracitado e pelo atobá *Sula leucogaster* (Figura 8). A hipótese de que a distribuição dos ninhos de *O. fuscatus* nas ilhas do Atol das Rocas é influenciada pela ocupação de seus predadores também foi defendida por HAZIN e MACEDO (2006). Elas também sugerem que além do caranguejo terrestre, outro predador de filhotes de *O. fuscatus* é o atobá mascarado *Sula Dactylatra*. A maior presença desta espécie na porção noroeste da Ilha do Farol também pode contribuir para a menor ocorrência de *O. fuscatus*, que evitaria o comportamento predatório dos atobás sobre seus filhotes. FASOLA e CANOVA (1991) sugerem que a distribuição dos ninhos é também determinada pela tendência de algumas espécies de aves marinhas preferirem ou evitarem a associação com espécies distintas. Segundo os autores, uma espécie de ave marinha colonial se associará a outras apenas se seu domínio nas interações agressivas nos territórios de nidificação for equilibrado. No caso da Ilha do Farol, a diferença de tamanho entre os atobás e *O. fuscatus* e *A. stolidus* contribuem para um desequilíbrio com relação ao potencial de agressão interespecífico, com as duas espécies menores ficando em desvantagem e preferindo, portanto, ocupar áreas sem a presença dominante dos atobás.

Figura 8 - Presença de potenciais predadores (*Johngarthia lagostoma* e *Sula leucogaster*) de ovos e filhotes de *O. fuscatus* e *A. stolidus* na Ilha do Farol.



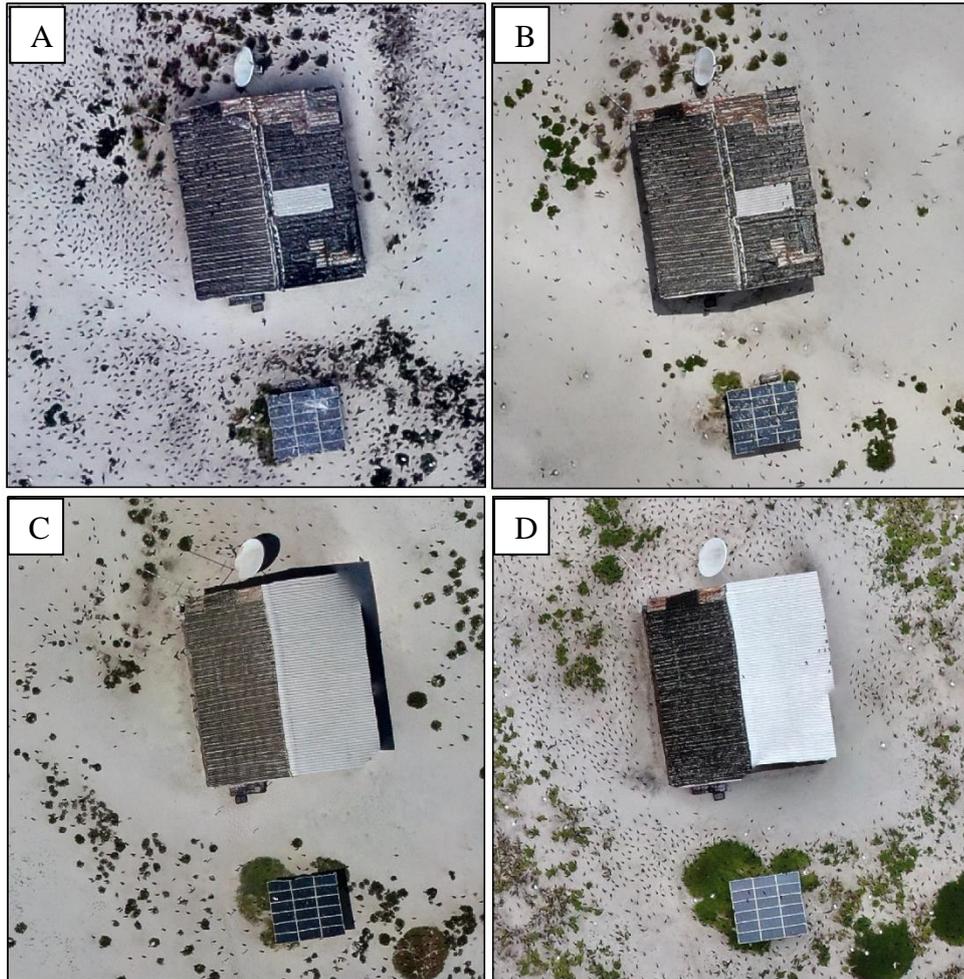
Fonte: A autora, 2023

Varição na Densidade do Ninhal

Ao comparar a densidade de aves (N° de aves/m²) entre as quatro expedições realizadas na Ilha do Farol (dez/20, mai/21, dez/21, mai/22), foi verificada uma diferença estatisticamente significativa entre períodos distintos (Kruskal-Wallis, $p < 0,05$). Essa diferença significativa na densidade de aves com relação ao fator temporal foi registrada entre dezembro de 2020 e maio de 2021, entre dezembro de 2020 e dezembro de 2021 e entre maio de 2021 e maio de 2022 (Mann-Whitney, $p < 0,05$).

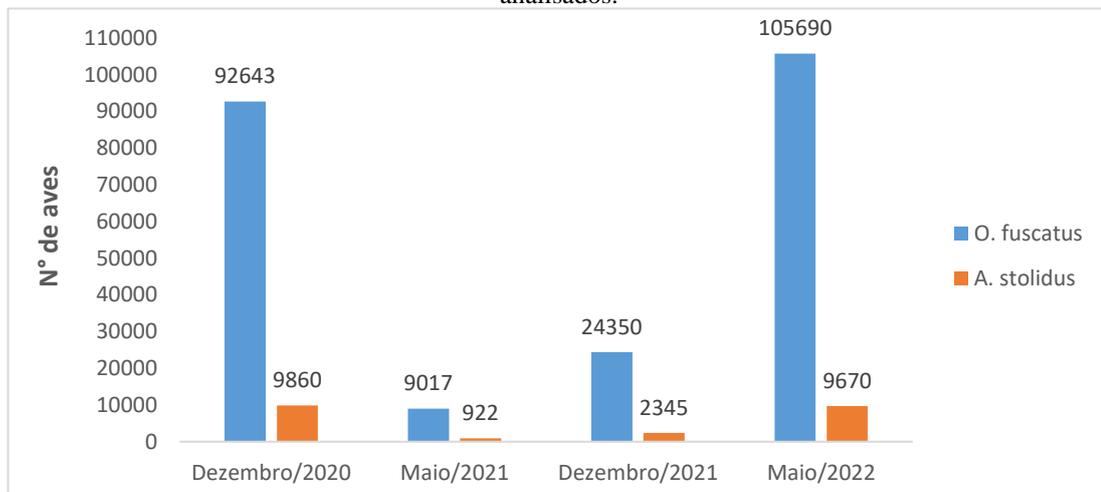
O maior número de aves foi registrado em maio de 2022 (115.360 aves) e dezembro de 2020 (102.503 aves), enquanto que o menor número foi registrado em maio de 2021 (9.939 aves) e dezembro de 2021 (26.695 aves). A Figura 9 ilustra a variação da quantidade de aves ao longo das expedições realizadas a partir de uma imagem capturada pelo RPAS. O gráfico apresentado na Figura 10 apresenta o quantitativo estimado para cada espécie. A proporção entre *O. fuscatus* e *A. stolidus* estimada foi semelhante àquela obtida pelo censo populacional realizado na década de 90 na mesma região (Schulz-Neto, 2004).

Figura 9 - Variação na quantidade de aves entre (A) dezembro/2020, (B) maio/2021, (C) dezembro/2021 e (D) maio/2022 em uma mesma região da Ilha do Farol.



Fonte: A autora, 2023

Figura 10 - Variação no número de aves estimado para cada espécie (*O. fuscatus* e *A. stolidus*) entre os períodos analisados.



Fonte: A autora, 2023

SCHULZ-NETO (2004) sugere que a sazonalidade reprodutiva destas aves é interferida pelo clima, que por sua vez atua na vegetação local. Nesse âmbito, o autor destaca que durante o período chuvoso na região (entre março e julho) a vegetação encontra-se normalmente densa, diminuindo as áreas de nidificação para *O. fuscatus* entre *Cyperus* sp., *P. oleracea* e *S. portulacastrum* e também diminuindo áreas de nidificação de *A. stolidus* sobre *Cyperus* sp.. No entanto, no presente trabalho foi verificado que a maior ocupação de aves ocorreu justamente na temporada em que a vegetação estava mais densa, durante o período chuvoso (maio/2022). Conforme mencionado anteriormente, a vegetação densa pode ter contribuído para um habitat ideal de nidificação (ex. proteção contra estresse térmico, contra ventos fortes e contra predadores), favorecendo uma maior quantidade de aves nesse período. Outro ponto a se considerar é que colônias reprodutivas de aves marinhas constituem uma relevante fonte de nutrientes (especialmente nitrogênio e fósforo) para o solo através do guano, considerado um fertilizante natural (Wainright et al., 1998; Sánchez-Piñero e Polis, 2000; Ellis, 2005). Uma maior população de aves em maio/2022 também pode ter colaborado para o desenvolvimento da vegetação na ilha.

A diferença significativa no número de aves considerando o mesmo mês em anos distintos sugere a inexistência de uma sazonalidade anual determinante na nidificação. Animais que se reproduzem de forma não sazonal não são limitados por picos anuais de disponibilidade de alimentos ou por padrões climáticos sazonais. Eles se reproduzem o ano todo ou em ciclos reprodutivos mais longos ou mais curtos do que o anual. Uma variação climática anual menos pronunciada contribui para que algumas populações de aves marinhas tropicais se reproduzam durante todo o ano (Hughes, 2014). Por exemplo, no Atol Johnston, no Oceano Pacífico central, atobás-de-pés-vermelhos, andorinhas-do-mar-brancas e aves tropicais de bico-vermelho *Phaethon aethereus* nidificam na maioria dos meses do ano (Schreiber & Burger 2002). O mesmo ocorre com *Phaeton lepturus* na Ilha de Ascensão (Stonehouse 1962). Com relação a *O. fuscatus*, em outras regiões do mundo, houve registro da espécie nidificando em intervalos subanuais, o ano inteiro, ou em períodos sazonais (Ashmole, 1963; Carr et al., 2020; SCHREIBER et al. 2002; Ashmole 1965; Hughes, 2014).

No caso da Ilha do Farol, fatores biológicos ou outros fatores externos (além da vegetação) que não foram mensurados podem ter resultado no maior número de aves em maio/2022 e dezembro/2020. Neste caso, a medição de outras variáveis biológicas e ambientais são fundamentais para uma melhor compreensão sobre a dinâmica populacional destas aves.

Apesar das dificuldades inerentes associadas ao censo de espécies de aves (Bibby et al., 1998), tendências no tamanho da população constituem a base das categorias de ameaça das espécies (Butchart e Bird, 2010). No entanto, a tendência no tamanho da população global de *O. fuscatus* está classificada na ficha técnica da espécie como 'Desconhecido' (HUGHES, 2014; BirdLife International, 2020). Não se considera que a tendência da população global de *O. fuscatus* esteja reduzindo de forma significativa ($> 30\%$ de declínio ao longo de três gerações; IUCN, 2022) para ser uma grande preocupação e a atual classificação da espécie na Lista Vermelha da IUCN é de “Pouco Preocupante” (Birdlife International, 2020; Hughes, 2014). No entanto, em algumas regiões que fazem parte da distribuição da espécie (por exemplo, Nova Gales do Sul, Austrália), ela é listada nacionalmente como uma espécie “vulnerável” (NSW National Parks & Wildlife Services, 2018). Além disso, as colônias de *O. fuscatus* que frequentemente se reproduzem em pequenas ilhas remotas são em geral consideradas mal monitoradas (Schreiber & Burger 2002; Hughes, 2014). Na REBIO Atol das Rocas, apesar da relevância desta Unidade de Conservação para as espécies aqui estudadas, abrigando a maior colônia de *O. fuscatus* do oceano Atlântico Sul e a maior colônia de *A. stolidus* do Brasil, o último censo de aves foi realizado na década de 90 (Schulz-Neto, 2004). Ou seja, são aproximadamente 30 anos sem dados associados à população da avifauna local.

É fundamental que haja um programa de monitoramento para acompanhar a variação populacional dessas aves e consequentemente, avaliar possíveis declínios/aumentos ocorridos ao longo dos anos e inferir quais as possíveis causas.

No caso da REBIO Atol das Rocas, vale destacar que houve um projeto piloto de Monitoramento com RPAS entre 2020 e 2022 abordando aspectos geomorfológicos e ecológicos. O presente trabalho ressalta a importância da continuidade deste monitoramento para a obtenção de dados a médio e longo prazo. A estimativa aqui apresentada é valiosa como referência para estudos posteriores na Ilha do Farol. Em caso de declínio populacional, a existência dos dados será fundamental para o planejamento de estratégias voltadas para a conservação dessas aves marinhas. Apesar da área de estudo já se tratar de uma Reserva Biológica, futuras ações de conservação poderão ser aplicadas em habitats de outras regiões utilizados pelas mesmas espécies. O fato de ser uma área de proteção integral, ou seja, sem interferência antrópica direta, permite a obtenção de respostas populacionais com relação a fatores ambientais de maior escala (ex. alterações climáticas, alteração na disponibilidade de alimentos), podendo ajudar na compreensão desses aspectos e mensurar seus respectivos impactos. Berr et al. (2023) destacam que apesar da importância ecológica, as comunidades de

aves marinhas em ilhas recifais ainda não foram objeto de análises biogeográficas consistentes em grande escala e a sua vulnerabilidade às alterações climáticas continua por avaliar.

Geomorfologia da Ilha do Farol e Potencial Influência na Distribuição de Aves

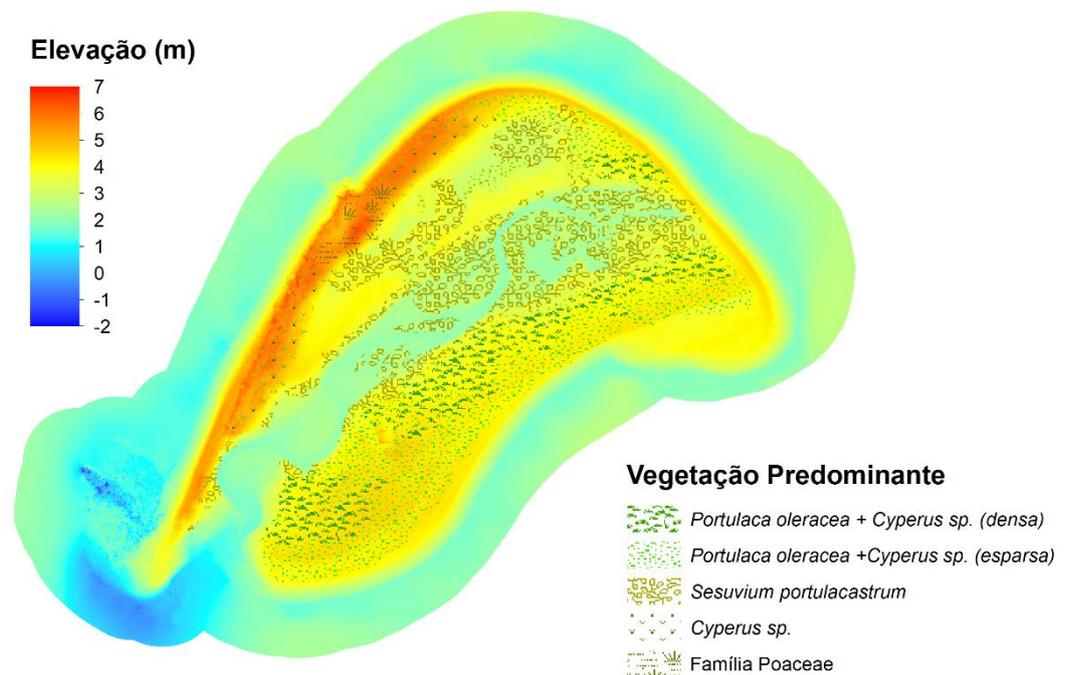
As características geomorfológicas das ilhas utilizadas por colônias reprodutivas de aves marinhas e suas variações constituem um dos fatores que influenciam na seleção do local de nidificação e podem interferir na dinâmica populacional. Estudos demonstram a importância da análise de variações geomorfológicas em associação com as colônias reprodutivas de aves marinhas, visto que a depender da dimensão dos processos sedimentares, a utilização do habitat para nidificação pode ser comprometida.

Em outras regiões do mundo, como no oeste do Oceano Índico, a erosão em ambientes insulares não impediu a ocorrência de ninhos de *A. stolidus*, mas privou *O. fuscatus* de antigas áreas de nidificação (Feare et al., 2007). Por outro lado, o acúmulo de sedimentos em algumas ilhas permitiu o estabelecimento de uma vegetação praial que posteriormente começou a ser colonizada por essa espécie. Analisando a localização dos ninhos do albatroz *Diomedea exulans* durante temporadas reprodutivas em uma Ilha subantártica, Momberg et al. (2023) verificaram que a topografia (elevação) da ilha é o fator mais determinante na seleção do local de nidificação, com os albatrozes nidificando apenas em baixas elevações. Burger e Lesser (1978) compararam características de 34 colônias de *Sterna hirundo* em Nova Jersey e verificaram que as aves selecionavam ilhas que eram suficientemente elevadas para evitar a inundação pela maré durante a temporada reprodutiva. Reynolds et al. (2012) analisaram a vulnerabilidade de aves marinhas aos efeitos das mudanças climáticas em um atol no noroeste do Pacífico e alertam para a perda de habitats de nidificação em função das projeções de aumento do nível do mar e inundações provocadas por ondas. Embora de natureza periódica, a inundação causada pelas ondas pode causar mudanças de longo prazo na cobertura da terra, estrutura e composição da vegetação, interferindo na dinâmica populacional de aves marinhas. Em um atol no Havaí, HATFIELD et al. (2012) analisaram os potenciais efeitos do aumento do nível do mar sobre colônias reprodutivas de aves marinhas. Os autores indicaram que a perda de habitats de nidificação na região será substancial caso a projeção do aumento de 2 metros no nível do mar até 2100 se concretize.

No presente estudo, apesar da ilha do Farol ser considerada em sua totalidade como de baixa elevação, é possível notar uma diferença na topografia, com a maior parte da ilha apresentando menor elevação (em torno de 4 metros) e uma faixa mais estreita, especialmente

na porção da ilha voltada para o oceano, apresentando maior elevação (em torno de 6 metros) (Figura 11). O ninhal de aves ocupa a ilha como um todo, mas é verificada uma preferência pela nidificação em áreas mais planas, ocupadas pela vegetação composta por *Portulaca oleracea* e *Cyperus sp.* Áreas de baixa elevação podem ser mais suscetíveis a eventos de inundação. No entanto, a tendência de migração da ilha do Farol em direção à laguna (Costa et al., 2017; Costa et al., 2019) garante uma certa estabilidade para os ninhos confeccionados nessa região.

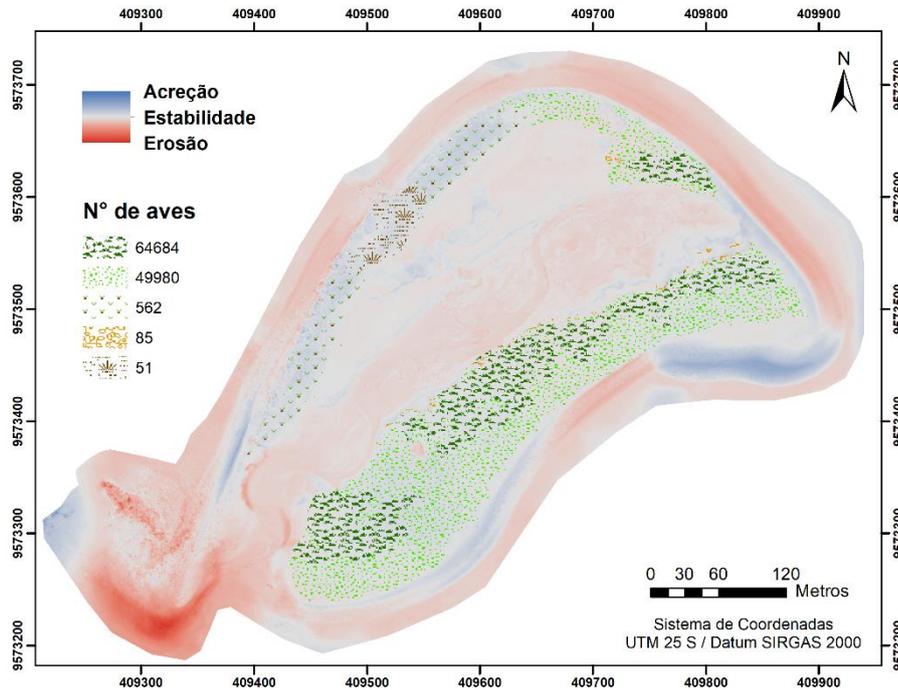
Figura 11 - Modelo Digital de Terreno da Ilha do Farol e vegetação predominante (Maio/2022).



Fonte: A autora, 2023

Analisando as variações geomorfológicas a curto prazo, verifica-se que as maiores variações tanto negativas (erosão) como positivas (acrecção) estão concentradas geralmente nas extremidades da ilha e na porção praial, ou seja, em áreas não ocupadas pelo ninhal (Figura 12). Ou seja, considerando estritamente esta escala temporal e o período analisado, não foi verificada uma interferência de processos erosivos no ninhal.

Figura 12 - Variações geomorfológicas na Ilha do Farol entre Maio de 2021 e Maio de 2022 e número de aves estimado na ilha considerando o período de maior densidade (Maio/22).

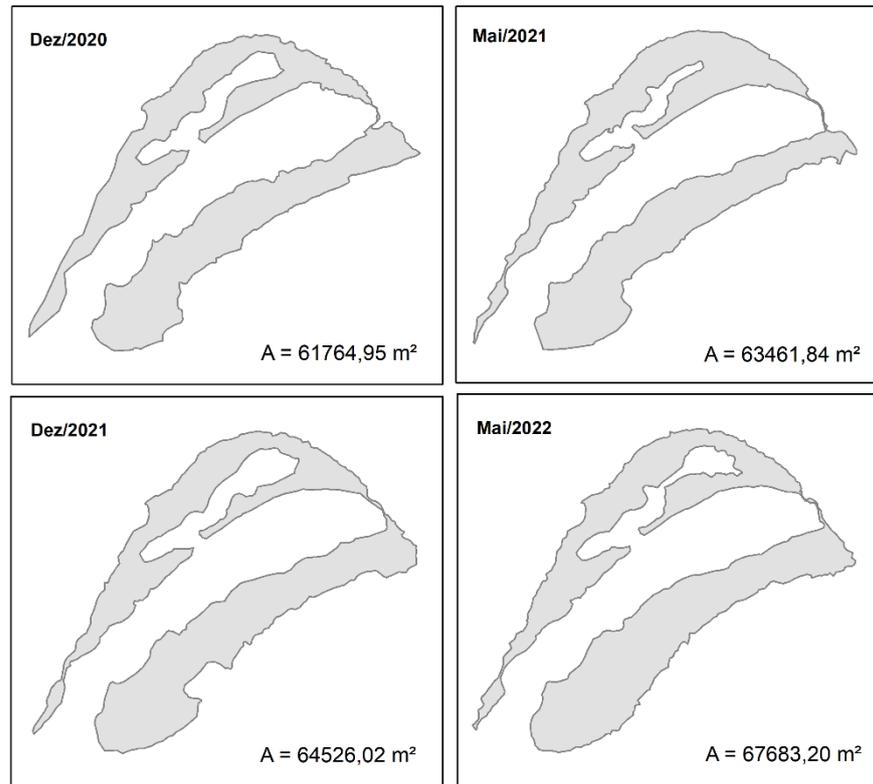


Fonte: A autora, 2023

As ilhas recifais são consideradas por alguns autores como uma das formas de relevo geomorfológicamente mais sensíveis a mudanças no nível do mar, processos de ondas, suprimento de sedimentos e impactos antrópicos, podendo sofrer erosão intensa e causar impactos ecológicos (Dickinson, 1999; Hubbard et al., 2014). Por outro lado, estudos recentes apresentam evidências de que essas ilhas são formas de relevo robustas que reagem dinamicamente às mudanças nas condições oceânicas e climáticas, apresentando certa resiliência. Tais estudos afirmam que existe um processo contínuo de erosão e acreção, resultando na migração das ilhas em plataformas de recife, estabilidade sedimentar ou até mesmo um aumento de área (Aslam e Kench, 2017; Dawson, 2021; Woodroffe et al., 2007; Talavera et al., 2021).

Com relação à Ilha do Farol, foi verificado a curto prazo um breve aumento da área emersa (Figura 13), ou seja, aumento da área disponível para o ninhal.

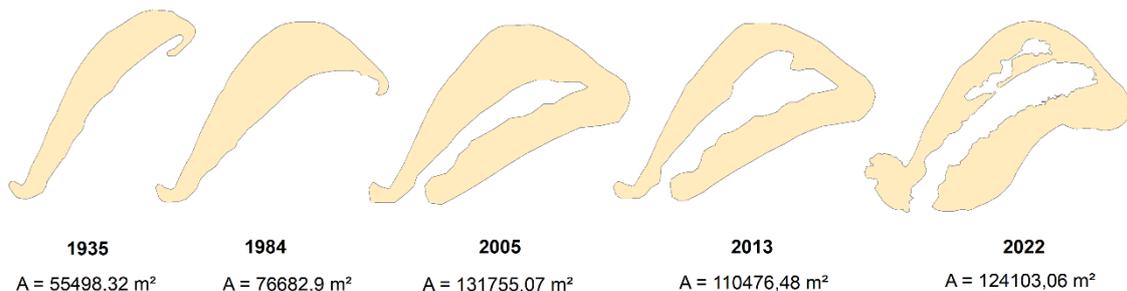
Figura 13 - Variação na área emersa da Ilha do Farol a curto prazo.



Fonte: A autora, 2023

A longo prazo, a Ilha do Farol também apresenta, em geral, um aumento de área (Figura 14).

Figura 14 - Variação na área emersa da Ilha do Farol a longo prazo.



Fonte: A autora, 2023 (Adaptado de Costa et al., 2017).

Por outro lado, é importante destacar a presença de uma depressão central (baía da lama) dinâmica com potencial de interferir na estabilidade geomorfológica da Ilha do Farol, o que contribui para a vulnerabilidade dos ninhos situados nas imediações desta feição com relação a processos erosivos e de inundação. A sua expansão entre 2005 e 2013 contribuiu para uma breve redução na área emersa da ilha, conforme exposto na Figura 14. Eventos extremos de ondas em conjunto com marés de sizígia favorecem a sobrelavagem de ondas para a baía da lama (Costa e Siegle, 2022), contribuindo para alterações em sua morfologia. Vale ressaltar que

as regiões onde foram verificadas uma maior densidade de aves, caracterizadas por vegetação densa, estão situadas relativamente próximas à depressão central. Sendo assim, alterações nesta feição interferem também na área disponível para nidificação e podem trazer impactos para os ninhos que comumente ficam situados em tais regiões. Outro ponto a se considerar é o crescimento da extremidade leste da ilha em direção à laguna. A longo prazo, caso este comportamento morfológico continue, existe a possibilidade deste prolongamento contribuir para a formação de uma nova depressão central na ilha do Farol. Analisando o modelo evolutivo desta ilha proposto por Costa et al. (2017), a formação da depressão central já existente na Ilha do Farol foi iniciada de forma equivalente.

As variações geomorfológicas mencionadas podem trazer futuras implicações na área do ninhal e ressaltam a importância de monitoramento. Segundo Berr et al. (2023), a erosão costeira acelerada e o declínio dos recifes provavelmente irão se somar a uma ampla gama de ameaças ecológicas que atualmente afetam as aves marinhas (por exemplo, espécies exóticas invasoras, perturbação humana, poluição plástica) que já as tornam um dos grupos de vertebrados mais ameaçados. Uma vez que a nidificação é a base da reprodução das aves marinhas e que ela pode ser afetada por variações geomorfológicas, esforços para mitigar o declínio mundial desse grupo de animais (Paleczny et al., 2015) deve incluir o monitoramento de aspectos geomorfológicos em ambientes insulares que compreendem colônias reprodutivas.

Contagem Semi-Automática de Aves

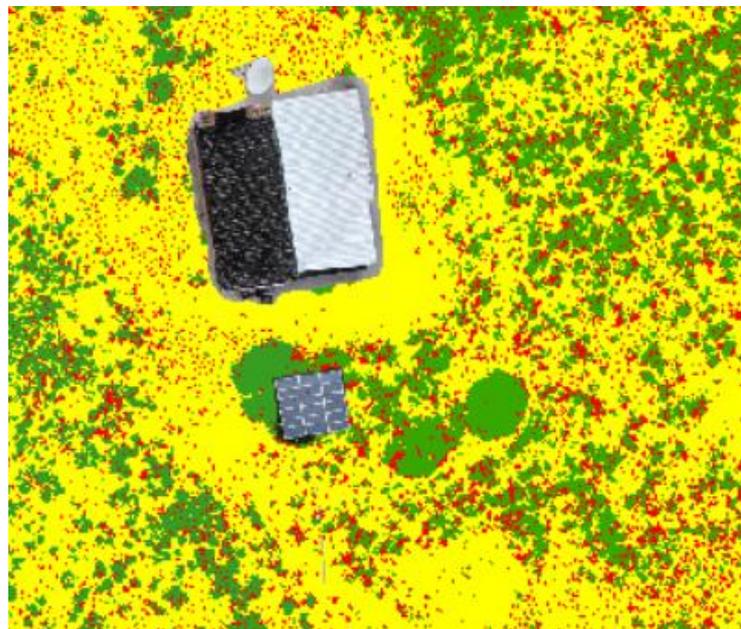
Em situações na qual a densidade de aves é bastante elevada, como verificado por exemplo na última expedição (maio/2022), a contagem de aves, mesmo sendo realizada por amostragem, requer um maior tempo. Neste caso, foi testada como alternativa uma metodologia envolvendo a classificação semiautomática de imagens para a quantificação das aves buscando a otimização do processo. Inicialmente, o método foi testado em um retângulo de aproximadamente 2000 m² (50 m x 40 m). Manualmente foram contabilizadas 6867 aves nesta área (Figura 15). Através do software *Ecognition*, após o processo de segmentação e classificação da imagem a partir de análise orientada a objeto, foram contabilizadas 7307 aves (Figura 16), o que equivale a um erro de 6%, considerado relativamente pequeno.

Figura 15 - Delimitação e quantificação manual de aves em retângulo de 2000 m².



Fonte: A autora, 2023

Figura 16 - Classificação supervisionada de imagens pelo software Ecognition. Os polígonos em vermelho indicam as aves detectadas de forma semi-automática.



Fonte: A autora, 2023

Em seguida, o mesmo procedimento foi aplicado para uma maior porção da ilha (Figura 17) dividida em quatro subáreas (A1, A2, A3 e A4). No entanto, no intuito de obter uma maior acurácia, foi coletada uma maior quantidade de amostras de treinamento. O valor final foi comparado com o valor obtido pelo método dos quadrados (quantificação de aves manualmente

em sete quadrados de 100m² dispostos na mesma área e extrapolada para a área total) e foi verificada uma diferença no quantitativo de aves final de apenas 1,2%.

Figura 17 - Resultado da classificação supervisionada aplicada para porção da Ilha do Farol



Fonte: A autora, 2023

A validação do método semiautomático foi realizada no ArcGIS através da geração de uma matriz de confusão que permitiu o posterior cálculo do coeficiente Kappa (K). Os resultados da validação foram $K(A1) = 0,88$; $K(A2) = 0,77$; $K(A3) = 0,78$; e $K(A4) = 0,82$. Segundo Landis e Koch (1977), o grau de concordância deste coeficiente variou de substancial a quase perfeito (Figura 18), indicando uma boa acurácia dos resultados e confiabilidade do método.

Figura 18. Classificação do Coeficiente Kappa segundo Landis e Koch (1977)

<u>Kappa Statistic</u>	<u>Strength of Agreement</u>
< 0.00	Poor
0.00–0.20	Slight
0.21–0.40	Fair
0.41–0.60	Moderate
0.61–0.80	Substantial
0.81–1.00	Almost Perfect

Fonte: Landis e Koch, 1977

Apesar dos resultados satisfatórios obtidos, vale destacar alguns fatores que dificultaram o processo de classificação semiautomática, resultando em uma metodologia temporalmente

dispendiosa: a existência de um fundo heterogêneo nas imagens obtidas na Ilha do Farol (substrato composto por vegetação escura, raízes da vegetação, tocas de caranguejo, dentre outros); o tamanho das aves relativamente pequeno; e a proximidade entre duas aves que ocasionalmente o *software* contabilizava como apenas uma. Esses fatores exigiram a coleta de um grande número de amostras de treinamento, além de uma avaliação posterior com correção manual nos casos em que a classificação não foi adequada. No entanto, ainda assim, foi demonstrado o potencial do *Ecognition* e da classificação de imagens a partir de análise orientada a objeto para o censo populacional de aves em colônias reprodutivas de forma semiautomatizada. Para tornar uma metodologia mais vantajosa, alterações durante a coleta de dados, como uma redução na altura do voo do RPAS, contribuiriam para uma melhor resolução dos ortomosaicos obtidos e, conseqüentemente, melhor detecção das aves e otimização do processo. Aves que têm um forte contraste com os fundos das imagens (por exemplo, aves escuras em fundos claros e homogêneos) são geralmente bastante sensíveis às detecções automáticas, em alguns casos apenas requerem um software simples de análise de imagens. Por outro lado, quando o fundo é heterogêneo (ex. mistura de areia, vegetação, rochas) e não existe um elevado contraste com as aves, a detecção e quantificação pode ser dificultada. Para tais situações mais desafiadoras, recursos sofisticados de softwares modernos de análise de imagens baseadas em objetos constituem uma metodologia eficiente para detectar aves com base em uma variedade de atributos, incluindo cor, tamanho, forma, textura e contexto espacial (Chabot e Francis, 2016). Utilizando o mesmo software e método, Andrew e Shepard (2017) realizaram a detecção automática de ninhos de águias marinhas. Apesar de algumas ressalvas e indicação de pontos de melhoria comuns aos verificados no presente trabalho, tais como o fundo das imagens bastante heterogêneo e a ausência de fortes características discriminatórias entre o objeto alvo e outros objetos naturais que ocorrem nas ilhas, os autores demonstraram que a identificação de ninhos a partir de fotografias aéreas de altíssima resolução usando análises avançadas de imagens é possível e apresentou um desempenho bastante positivo. Groom et al. (2013) também aplicaram a análise de imagem orientada a objetos para quantificar aves marinhas e obtiveram resultados satisfatórios. Rush et al. (2018) demonstraram que os RPAS podem fornecer contagens precisas de gaivotas-de-dorso-preto, *L. fuscus*, que nidificam em colônias, sem perturbações indevidas, usando processamento de imagem semiautomático. A detecção semiautomática de aves marinhas em colônias reprodutivas é importante para censos populacionais, orientando o monitoramento e manejo das espécies.

Com os avanços tecnológicos e popularização da Inteligência Artificial, vale destacar também outras metodologias recentes que vêm sendo aplicadas para o censo populacional de aves marinhas a partir de imagens obtidas por RPAS (Akçay et al., 2020; Chen et al., 2023; Wu et al., 2022; Kellenberger et al., 2021; Tuia et al., 2022). Um exemplo é a utilização de Redes Neurais Convolucionais (CNN). Nesse âmbito, Hayes et al. (2021) analisaram a capacidade de monitoramento de aves marinhas usando CNNs para detectar albatrozes e pinguins em uma de suas maiores colônias de reprodução, as Ilhas Falkland (Malvinas). Os autores verificaram que essas técnicas têm grande potencial para monitoramento de aves marinhas em colônias significativas e espacialmente complexas, constituindo uma ferramenta viável de avaliação populacional, proporcionando oportunidades para reduzir o trabalho manual, os custos e o erro em comparação a métodos tradicionais. Kellenberg et al. (2021) também obtiveram resultados satisfatórios utilizando CNN para detectar andorinhas-do-mar e gaivotas em colônias densas a partir de imagens derivadas de RPAS mesmo com fundo heterogêneo.

As informações aqui trazidas demonstram a importância de estudos futuros associando técnicas computacionais e estudos ecológicos como forma de ampliar a potencialidade do RPAS como ferramenta de monitoramento da população de aves marinhas e identificação de seus padrões de distribuição, permitindo, assim, maiores esforços voltados à conservação desse grupo de animais.

CONCLUSÃO

A partir dos ortomosaicos gerados pelas imagens capturadas por RPAS na Ilha do Farol foi possível estimar a quantidade de aves na ilha em épocas distintas bem como analisar a distribuição espacial e compreender as preferências de seleção do local de nidificação. Foi verificada uma preferência para ambas as espécies *O. fuscatus* e *A. stolidus* por nidificar nas regiões caracterizadas por vegetação mais densa composta por *Cyperus* sp. e *P. oleracea*, situada especialmente nas porções centrais da ilha. Áreas desprovidas de vegetação praticamente não são utilizadas como local de nidificação, à exceção de poucos registros de ninhos de *O. fuscatus*. A diferença entre as quantidades obtidas considerando mesmos meses em anos distintos sugere que a reprodução dessas aves não tem variações climáticas sazonais como fator determinante. As maiores variações geomorfológicas da Ilha do Farol estão concentradas nas extremidades e a curto prazo não são prejudiciais ao ninhal. A longo prazo, o modelo de evolução da ilha do Farol também demonstra, em geral, um aumento de área na ilha, ou seja, aumento de áreas disponíveis para ocupação pelas aves marinhas. No entanto, cabe destacar a presença da

depressão central, uma feição dinâmica que a longo prazo pode afetar a distribuição dos ninhos. O trabalho destaca a importância do monitoramento envolvendo tanto aspectos geomorfológicos da ilha como aspectos ecológicos associados à dinâmica populacional e distribuição espacial de aves marinhas. O RPAS se mostrou uma ferramenta eficiente para a obtenção de dados associados a esses aspectos. Sendo assim, espera-se que seu uso seja incentivado em outros ambientes, especialmente aqueles de grande relevância para a manutenção da biodiversidade marinha, como Unidades de Conservação. A aplicação da classificação supervisionada de imagens a partir da análise orientada a objetos demonstrou resultados satisfatórios, mas ainda requer ajustes para se tornar mais efetiva e menos temporalmente dispendiosa. Por fim, tecnologias mais avançadas envolvendo inteligência artificial aparenta ser uma área promissora para esforços voltados à conservação de aves marinhas, otimizando ainda mais os censos populacionais e a compreensão de padrões espaciais de nidificação.

REFERÊNCIAS

- Akçay, H. G., Kabasakal, B., Aksu, D., Demir, N., Öz, M., & Erdoğan, A. (2020). Automated bird counting with deep learning for regional bird distribution mapping. *Animals*, *10*(7), 1207.
- Andrew, M. E., & Shephard, J. M. (2017). Semi-automated detection of eagle nests: an application of very high-resolution image data and advanced image analyses to wildlife surveys. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, *3*(2), 66-80.
- Antas, P. D. T. Z., Carrara, L. A., Ubaid, F. K., Oliveira-Junior, S. B., & Ferreira, L. P. (2016). Aves coloniais da Reserva Particular do Patrimônio Natural Sesc Pantanal. *Conhecendo o Pantanal*, *10*.
- Ashmole, N.P. 1963a. The biology of the Wideawake or Sooty Tern *Sterna fuscata* on Ascension Island. *Ibis* *103a*: 297–364.
- Aslam, M., & Kench, P. S. (2017). Reef island dynamics and mechanisms of change in Huvadho Atoll, Republic of Maldives, Indian Ocean. *Anthropocene*, *18*, 57-68.
- Baatz, M., Hoffmann, C., & Willhauck, G. (2008). Progressing from object-based to object-oriented image analysis. *Object-based image analysis: Spatial concepts for knowledge-driven remote sensing applications*, 29-42.
- Berr, T., Dias, M. P., Andréfouët, S., Davies, T., Handley, J., Le Corre, M., ... & Vidal, É. (2023). Seabird and reef conservation must include coral islands. *Trends in Ecology & Evolution*.
- Bibby, C. J., Jones, M., & Marsden, S. (1998). *Bird surveys* (pp. 1-137). London: Expedition Advisory Centre.
- BirdLife International (2020). *Onychoprion fuscatus*. The IUCN Red List of Threatened Species 2020: e.T22694740A168895142. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2020-3.RLTS.T22694740A168895142.en>. Accessed on 29 August 2023.
- BROOKE, S., GRAHAM, D., JACOBS, T., LITNAN, C., MANUEL, M., & O'CONNOR, R. Testing marine conservation applications of unmanned aerial systems (UAS) in a remote MPA. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, *3*(4), 237-251, 2015.
- Buckley, F. G., & Buckley, P. A. (1980). Habitat selection and marine birds. In *Behavior of Marine Animals: Current Perspectives in Research. Marine Birds* (pp. 69-112). Boston, MA: Springer US.

- Burger, J., & Gochfeld, M. (1985). Nest site selection by Laughing Gulls: comparison of tropical colonies (Culebra, Puerto Rico) with temperate colonies (New Jersey). *The Condor*, 87(3), 364-373.
- Burger, J., & Gochfeld, M. (1986). Nest site selection in sooty terns (*Sterna fuscata*) in Puerto Rico and Hawaii. *Colonial Waterbirds*, 31-45.
- Burger, J. O. A. N. N. A., & Lesser, F. R. E. D. (1978). Selection of colony sites and nest sites by Common Terns *Sterna hirundo* in Ocean County, New Jersey. *Ibis*, 120(4), 433-449.
- Carey, M. J. (2009). The effects of investigator disturbance on procellariiform seabirds: a review. *New Zealand Journal of Zoology*, 36(3), 367-377.
- Carr, P. 2020. British Indian Ocean Territory Biodiversity Action Plan: Sooty Tern Prepared by Bangor University for the BIOT Administration, FCO, King Charles Street, London.
- Chabot, D., & Francis, C. M. (2016). Computer-automated bird detection and counts in high-resolution aerial images: a review. *Journal of Field Ornithology*, 87(4), 343-359.
- CHABOT, D., & BIRD, D. M. Wildlife research and management methods in the 21st century. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 3(4), 137-155, 2015.
- Chen, X., Pu, H., He, Y., Lai, M., Zhang, D., Chen, J., & Pu, H. (2023). An Efficient Method for Monitoring Birds Based on Object Detection and Multi-Object Tracking Networks. *Animals*, 13(10), 1713.
- Chubey, M. S., Franklin, S. E., & Wulder, M. A. (2006). Object-based analysis of Ikonos-2 imagery for extraction of forest inventory parameters. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(4), 383-394.
- COSTA, M. B., MACEDO, E. C., & SIEGLE, E. Planimetric and volumetric changes of reef islands in response to wave conditions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(15), 2663-2678, 2017.
- COSTA, M. B., MACEDO, E. C., & SIEGLE, E. Wave refraction and reef island stability under rising sea level. *Global and Planetary Change*, 172, 256-267, 2019.
- Costa, M. B., & Siegle, E. (2022). Wave climate and extremes on a mesotidal atoll lagoon. *Ocean and Coastal Research*, 70.
- Croxall, J. P., Trathan, P. N., & Murphy, E. J. (2002). Environmental change and Antarctic seabird populations. *Science*, 297(5586), 1510-1514.
- Croxall, J. P., Butchart, S. H., Lascelles, B. E. N., Stattersfield, A. J., Sullivan, B. E. N., Symes, A., & Taylor, P. H. I. L. (2012). Seabird conservation status, threats and priority actions: a global assessment. *Bird Conservation International*, 22(1), 1-34.
- Dawson, J. L. (2021). Multi-decadal shoreline morphodynamics of a shelf-edge reef island, Great Barrier Reef: Implications for future island persistence. *Geomorphology*, 392, 107920.
- Diamond, A. W., & Devlin, C. M. (2003). Seabirds as indicators of changes in marine ecosystems: ecological monitoring on Machias Seal Island. *Environmental monitoring and assessment*, 88, 153-181.
- Dias, M. P., Martin, R., Pearmain, E. J., Burfield, I. J., Small, C., Phillips, R. A., ... & Croxall, J. P. (2019). Threats to seabirds: a global assessment. *Biological Conservation*, 237, 525-537.
- Dickinson, W. R. (1999). Holocene sea-level record on Funafuti and potential impact of global warming on central Pacific atolls. *Quaternary Research*, 51(2), 124-132.
- Edney, A. J., & Wood, M. J. (2021). Applications of digital imaging and analysis in seabird monitoring and research. *Ibis*, 163(2), 317-337.
- Einoder, L. D. (2009). A review of the use of seabirds as indicators in fisheries and ecosystem management. *Fisheries Research*, 95(1), 6-13.

- Ellis, J. C. (2005). Marine birds on land: a review of plant biomass, species richness, and community composition in seabird colonies. *Plant Ecology*, 181, 227-241.
- Entringer Jr, H., & Srbek-Araujo, A. C. (2023). Habitat use, non-breeding groupings and chromatic pattern in *Johngarthia lagostoma* (H. Milne Edwards, 1837)(Decapoda, Gecarcinidae) in Trindade Island, South Atlantic Ocean. *Neotropical Biology and Conservation*, 18(1), 83-95.
- Fasola, M., & Canova, L. (1991). Colony site selection by eight species of gulls and terns breeding in the Valli di Comacchio (Italy). *Italian Journal of Zoology*, 58(3), 261-266.
- Fischer, C. F., Avelar, J. C. L., Brito, M., Grosman, A., Carvalho, D. A., Carneiro, C. L., & Arruda, M. B. (2007). Plano de manejo para a reserva biológica Atol das Rocas. 235p. *Ministério do Meio Ambiente/Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, Brasília, DF, Brasil*.
- Feare, C. J., Gill, E. L., Carty, P., Carty, H. E., & Ayrton, V. J. (1997). Habitat use by Seychelles sooty terns *Sterna fuscata* and implications for colony management. *Biological Conservation*, 81(1-2), 69-76.
- Feare, C. J. (1976). The breeding of the Sooty Tern *Sterna fuscata* in the Seychelles and the effects of experimental removal of its eggs. *Journal of Zoology*, 179(3), 317-360.
- Feare, C. J., Jaquemet, S., & Le Corre, M. (2007). An inventory of Sooty Terns (*Sterna fuscata*) in the western Indian Ocean with special reference to threats and trends. *Ostrich-Journal of African Ornithology*, 78(2), 423-434.
- Frederick, P. C., Hylton, B., Heath, J. A., & Ruane, M. (2003). Accuracy and variation in estimates of large numbers of birds by individual observers using an aerial survey simulator. *Journal of Field Ornithology*, 74(3), 281-287.
- Furness, R. W. (2012). *Seabird ecology*. Springer Science & Business Media.
- GABRLIK, P., COUR-HARBO, A. L., KALVODOVA, P., ZALUD, L., & JANATA, P. Calibration and accuracy assessment in a direct georeferencing system for UAS photogrammetry. *International Journal of Remote Sensing*, 39(15-16), 4931-4959, 2018.
- GOEBEL, M. E., PERRYMAN, W. L., HINKE, J. T., KRAUSE, D. J., HANN, N. A., GARDNER, S., & LEROI, D. J. A small unmanned aerial system for estimating abundance and size of Antarctic predators. *Polar Biology*, 38(5), 619-630, 2015.
- GRENZDÖRFFER, G. J. UAS-based automatic bird count of a common gull colony. *International archives of the photogrammetry, Remote sensing and spatial information sciences*, 1, 2013.
- Groom, G., Stjernholm, M., Nielsen, R. D., Fleetwood, A., & Petersen, I. K. (2013). Remote sensing image data and automated analysis to describe marine bird distributions and abundances. *Ecological Informatics*, 14, 2-8.
- HAMILTON, W. D. Geometry of the selfish herd. *Journal of Theoretical Biology*, v. 31, p. 295- 311, 1971.
- Hatfield, J. S., Reynolds, M. H., Seavy, N. E., & Krause, C. M. (2012). Population dynamics of Hawaiian seabird colonies vulnerable to sea-level rise. *Conservation Biology*, 26(4), 667-678.
- HAZIN, M. C.; MACEDO, R. H. Sooty tern nesting success as a function of nest location, density and vegetation type in a neotropical Atoll. *Revista Brasileira de Ornitologia*, v.14, n.3, p.261-268, 2006.
- Hubbard, D., Gischler, E., Davies, P., Montaggioni, L., Camoin, G., Dullo, W. C., ... & Scheffers, S. (2014). Island outlook: warm and swampy. *Science*, 345(6203), 1461-1461.
- Hughes, B. J. (2014). *Breeding and population ecology of Sooty Terns on Ascension Island* (Doctoral dissertation, University of Birmingham).
- Hutchinson, A. E. (1980, January). Estimating numbers of colonial nesting seabirds: a comparison of techniques. In *Proceedings of the Colonial Waterbird Group* (Vol. 3, pp. 235-244). Waterbird Society.
- IUCN Standards and Petitions Committee. 2022. Guidelines for Using the IUCN Red List Categories and Criteria. Version 15.1. Prepared by the Standards and Petitions Committee. Downloadable from <https://www.iucnredlist.org/documents/RedListGuidelines.pdf>. Acesso em 29/08/2023.

- Kellenberger, B., Veen, T., Folmer, E., & Tuia, D. (2021). 21 000 birds in 4.5 h: efficient large-scale seabird detection with machine learning. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 7(3), 445-460.
- KOH, L. P., & WICH, S. A. Dawn of drone ecology: low-cost autonomous aerial vehicles for conservation. *Tropical conservation science*, 5(2), 121-132, 2012. LAZRUS, Hr. Sea change: island communities and climate change. *Annual Review of Anthropology*, v. 41, p. 285-301, 2012.
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). An application of hierarchical kappa-type statistics in the assessment of majority agreement among multiple observers. *Biometrics*, 363-374.
- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W., Chipman, J.W. Remote sensing and interpretation. 5ed. Madison: Wiley, 2004. 763p
- Lokhande, V. H., Gor, B. K., Desai, N. S., Nikam, T. D., & Suprasanna, P. (2013). Sesuvium portulacastrum, a plant for drought, salt stress, sand fixation, food and phytoremediation. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33, 329-348.
- LÓPEZ, J., & MULERO-PÁZMÁNY, M. Drones for conservation in protected areas: present and future. *Drones*, 3(1), 10, 2019.
- Mancini, P. L., Serafini, P. P., & Bugoni, L. (2016). Breeding seabird populations in Brazilian oceanic islands: historical review, update and a call for census standardization. *Revista Brasileira de Ornitologia*, 24, 94-115.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Panorama da conservação dos ecossistemas costeiros e marinhos no Brasil. Brasília: MMA/SBF/GBA, 2010.
- Momberg, M., Ryan, P. G., Hedding, D. W., Schoombie, J., Goddard, K. A., Craig, K. J., & Le Roux, P. C. (2023). Factors determining nest-site selection of surface-nesting seabirds: a case study on the world's largest pelagic bird, the Wandering Albatross (*Diomedea exulans*). *Ibis*, 165(1), 190-203.
- NSW National Parks & Wildlife Services. Threatened species. Sooty tern Profile. Disponível em: <https://www.environment.nsw.gov.au/threatenedspeciesapp/profile.aspx?id=10770>, acesso em 28 de agosto de 2023.
- Paleczny, M., Hammill, E., Karpouzi, V., & Pauly, D. (2015). Population trend of the world's monitored seabirds, 1950-2010. *PloS one*, 10(6), e0129342.
- Parsons, M., Mitchell, I., Butler, A., Ratcliffe, N., Frederiksen, M., Foster, S., & Reid, J. B. (2008). Seabirds as indicators of the marine environment. *ICES Journal of Marine Science*, 65(8), 1520-1526.
- Phillips, R. A., Gales, R., Baker, G. B., Double, M. C., Favero, M., Quintana, F., ... & Wolfaardt, A. (2016). The conservation status and priorities for albatrosses and large petrels. *Biological Conservation*, 201, 169-183.
- Piatt, J. F., Sydeman, W. J., & Wiese, F. (2007). Introduction: a modern role for seabirds as indicators. *Marine Ecology progress series*, 352, 199-204.
- RATCLIFFE, N., GUIHEN, D., ROBST, J., CROFTS, S., STANWORTH, A., & ENDERLEIN, P. A protocol for the aerial survey of penguin colonies using UAVs. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 3(3), 95-101, 2015.
- Reynolds, M. H., Berkowitz, P., Courtot, K. N., & Krause, C. M. (2012). *Predicting sea-level rise vulnerability of terrestrial habitat and wildlife of the Northwestern Hawaiian Islands* (No. 2012-1182). US Geological Survey.
- Rush, G. P., Clarke, L. E., Stone, M., & Wood, M. J. (2018). Can drones count gulls? Minimal disturbance and semiautomated image processing with an unmanned aerial vehicle for colony-nesting seabirds. *Ecology and evolution*, 8(24), 12322-12334.
- Saliva, J. E., & Burger, J. (1989). Effect of experimental manipulation of vegetation density on nest-site selection in Sooty Terns. *The Condor*, 91(3), 689-698.
- Sánchez-Piñero, F., & Polis, G. A. (2000). Bottom-up dynamics of allochthonous input: direct and indirect effects of seabirds on islands. *Ecology*, 81(11), 3117-3132.
- SARDÀ-PALOMERA, F., BOTA, G., VIÑOLO, C., PALLARÉS, O., SAZATORNIL, V., BROTONS, L. & SARDÀ, F. Fine-scale bird monitoring from light unmanned aircraft systems. *Ibis*, 154(1), 177-183, 2011.

- Schreiber, E.A., & Burger, J. 2002. *Biology of marine birds*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- SCHULZ-NETO, A. Aves marinhas do Atol das Rocas. *Aves marinhas e insulares brasileiras: biologia e conservação*. Itajaí, Editora da Univali, 266p, 169-192, 2004.
- Soares, M.O., de Paiva, C. C., de Godoy, T., de Brito Silva, M., & de Castro, C. S. S. (2010). Gestão ambiental de ecossistemas insulares: O caso da reserva biológica do atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial. *Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 10(3), 347-360.
- Stonehouse, B. 1962. The tropic birds (genus *Phaethon*) on Ascension Island. *Ibis* 103: 124–161.
- Sutherland, W. J. (2008). *The conservation handbook: research, management and policy*. John Wiley & Sons.
- Talavera, L., Vila-Concejo, A., Webster, J. M., Smith, C., Duce, S., Fellowes, T. E., ... & Hacker, J. (2021). Morphodynamic Controls for Growth and Evolution of a Rubble Coral Island. *Remote Sensing*, 13(8), 1582.
- Teixeira, D.M.; Luigi, G. & Schloemp, I.M. 1991. Aves brasileiras como presas de artrópodes. *Ararajuba* 2: 69-74.
- Wait, D. A., Aubrey, D. P., & Anderson, W. B. (2005). Seabird guano influences on desert islands: soil chemistry and herbaceous species richness and productivity. *Journal of Arid Environments*, 60(4), 681-695.
- Wainright, S. C., Haney, J. C., Kerr, C., Golovkin, A. N., & Flint, M. V. (1998). Utilization of nitrogen derived from seabird guano by terrestrial and marine plants at St. Paul, Pribilof Islands, Bering Sea, Alaska. *Marine Biology*, 131, 63-71.
- Woehler, E. J. (1996). Concurrent decreases in five species of Southern Ocean seabirds in Prydz Bay. *Polar Biology*, 16, 379-382.
- Woodroffe, C. D., Samosorn, B., Hua, Q., & Hart, D. E. (2007). Incremental accretion of a sandy reef island over the past 3000 years indicated by component-specific radiocarbon dating. *Geophysical Research Letters*, 34(3).
- Wray, T. Jr., and R. C. Whitmore 1979. Effects of Vegetation on Nesting Success of Vesper Sparrows. *Auk* 96:802-805.
- Wu, H., Tang, Y., Zheng, H., Zhang, Z., & Zhang, X. (2022, April). Seabird statistics in coastal wetlands based on aerial views from drones. In *2022 3rd International Conference on Geology, Mapping and Remote Sensing (ICGMRS)* (pp. 219-223). IEEE.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse estudo identificou as regiões das ilhas do Atol das Rocas que apresentam maior dinâmica sedimentar, estando essas situadas principalmente nas extremidades de ambas as ilhas. Foi verificado o prolongamento de uma das extremidades em direção à laguna. Apesar das taxas de variação da linha de costa terem sido elevadas, as quantificações dos recuos e progradações foram similares e, portanto, sugerem um equilíbrio sedimentar a curto prazo. A presença da depressão central (Baía da Lama) na Ilha do Farol e sua dinâmica interfere na estabilidade geomorfológica dessa ilha e merece destaque. Com relação a esta feição, vale ressaltar alguns aspectos: à nordeste da baía, a predominância de erosão verificada tanto pelo balanço sedimentar negativo em termos volumétricos, como pelas taxas de recuo da linha de costa durante o período estudado, alerta para uma possível conexão da Baía da Lama com a laguna, o que poderia segmentar a ilha do Farol em duas ilhas menores no futuro. Nesta região praticamente não existe mais pós-praia, ou seja, a linha de vegetação faz contato com o lado oposto em marés de sizígia. O recuo da linha de costa na região supracitada também foi verificado considerando dados mais antigos (de 17 anos atrás), onde houve grande perda de sedimentos e de vegetação até os dias atuais. Com relação à vegetação típica da baía da lama, além do crescimento verificado em suas margens imediatas, durante os anos analisados houve o novo estabelecimento de uma parte da vegetação associada à sua bifurcação, o que pode ser um indício da expansão da baía para essa área. O prolongamento da extremidade leste da ilha do Farol em direção à laguna verificado se assemelha ao processo de formação da depressão central já existente, o que pode ser um indício que no futuro ocorra o surgimento de uma nova depressão central. Com relação às análises sazonais, o mês de dezembro foi caracterizado pelo predomínio de erosão, em que as ilhas apresentaram menor área total e um balanço sedimentar negativo, e o mês de maio foi caracterizado por acreção, com as ilhas apresentando uma área maior e balanço sedimentar positivo. Condições hidrodinâmicas *offshore* distintas entre esses dois períodos podem ter contribuído para as variações morfológicas detectadas. Os resultados ressaltam a influência da baía da lama na estabilidade geomorfológica da Ilha do Farol e indicam que o monitoramento para identificar as alterações nesta depressão central a longo prazo (migração, bifurcações, expansão/estreitamento) são considerados de extrema importância. Esse tipo de análise pode contribuir para a compreensão das variações geomorfológicas de ilhas recifais que contenham esta feição (depressão central) em outras regiões do mundo.

Apesar de não terem sido verificadas alterações geomorfológicas nesta ilha que tragam impactos negativos diretos na nidificação de aves marinhas a curto prazo, o monitoramento a médio e longo prazo é fundamental. Com relação aos aspectos ecológicos, os resultados demonstraram que a distribuição espacial na ilha do Farol é influenciada pelo padrão de vegetação. Houve uma preferência das aves por nidificar sobre vegetação densa, composta por *Cyperus* sp. e *Portulaca oleracea* distribuídas nas regiões mais centrais da ilha. Com relação à variação na quantidade de aves considerando as quatro temporadas reprodutivas analisadas, o maior número foi registrado em maio/2022, totalizando uma população estimada de 115.360 aves, sendo 105690 *O. fuscatus* e 9670 *A. stolidus* na Ilha do Farol. Em comparação ao mesmo mês no ano anterior, houve uma diferença estatisticamente significativa, sugerindo a inexistência de uma sazonalidade anual determinante na nidificação. Os dados obtidos associados ao censo populacional das aves marinhas, bem como aos padrões espaciais de ocupação, são fundamentais para servir como referência em estudos futuros. Tais informações são importantes para analisar flutuações na população e, em caso de declínio, podem contribuir para a detecção de impactos ambientais tanto nos habitats de nidificação como no oceano. Além disso, tornam-se essenciais para a criação de estratégias de conservação de *A. stolidus* e *O. fuscatus*.

Com relação ao RPAS, ressalta-se o seu valor como ferramenta eficiente para o monitoramento dos aspectos geomorfológicos e ecológicos abordados no presente trabalho. Diferentemente de outros métodos associados a censos populacionais, não houve distúrbios na população de aves marinhas estudadas, mas vale salientar que foram tomados os devidos cuidados para isso, especialmente por se tratar de uma Reserva Biológica, tais como altura do voo elevada (90 metros) e ponto de decolagem da aeronave distante da colônia, justamente para evitar impactos. No entanto, vale destacar que um conhecimento da área, seja a partir de levantamento em campo ou a partir de outros trabalhos, é fundamental para obter informações que não puderam ser aferidas a partir dos ortomosaicos gerados pelo RPAS. Nesse caso, isso foi aplicado para algumas características da vegetação e para detectar a proporção das duas espécies de aves estudadas. Ainda assim, o RPAS permitiu a obtenção de imagens aéreas de alta resolução e seu armazenamento, juntamente com os produtos obtidos em SIG, permite a criação de um banco de dados geoespaciais que pode ser utilizado como referência para comparações futuras. O procedimento metodológico adotado no trabalho pode ser aplicado para outros ambientes e outras espécies de aves marinhas, especialmente em áreas remotas e de grande relevância ecológica. Portanto, pode aprimorar a gestão de Unidades de Conservação,

contribuindo para a inovação de técnicas pesquisa e monitoramento, sobretudo em um contexto de mudanças climáticas. Com relação a este aspecto, vale ressaltar que o trabalho foi realizado paralelamente a um projeto piloto de monitoramento da REBIO Atol das Rocas, uma parceria entre o ICMBIO e o Laboratório de Oceanografia Geológica da UFPE, financiado pela Fundação Grupo Boticário de Apoio à Natureza. O monitoramento aborda, dentre outros eixos, os aspectos geomorfológicos das ilhas recifais e a distribuição e densidade do ninhal a partir de RPAS. Os resultados obtidos na presente dissertação ressaltam a necessidade da manutenção do monitoramento na REBIO Atol das Rocas, que finalizou em 2022, para a obtenção de resultados mais robustos a médio e longo prazo, reforçando o potencial do RPAS. Por fim, a partir da experiência obtida, foi elaborado um documento técnico intitulado “Aplicação de RPAS (drones) para Pesquisa, Monitoramento e Fiscalização em Unidades de Conservação Marinhas: Protocolo Operacional” (Apêndice A), que será repassado para gestores de outras Unidades de Conservação. É esperado que as orientações trazidas aprimorem atividades de pesquisa, monitoramento e fiscalização, gerando subsídio para tomadas de decisão e definição de estratégias conservacionistas para espécies marinhas.

REFERÊNCIAS

- AKÇAY, H. G., KABASAKAL, B., AKSU, D., DEMIR, N., ÖZ, M., & ERDOĞAN, A. Automated bird counting with deep learning for regional bird distribution mapping. *Animals*, 10(7), 1207, 2020.
- ANDREW, M. E., & SHEPHARD, J. M. Semi-automated detection of eagle nests: an application of very high-resolution image data and advanced image analyses to wildlife surveys. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 3(2), 66-80, 2017.
- ANTAS, P. D. T. Z., CARRARA, L. A., UBAID, F. K., OLIVEIRA-JUNIOR, S. B., & FERREIRA, L. P. *Aves coloniais da Reserva Particular do Patrimônio Natural Sesc Pantanal*. Conhecendo o Pantanal, Rio de Janeiro: Serviço Social do Comércio, 10, 236 p., 2016.
- ARAÚJO, R. V., PEREIRA, P. S., LINO, A. P., ARAÚJO, T. M., & GONÇALVES, R. M. (2021). Morphodynamic study of sandy beaches in a tropical tidal inlet using RPAS. *Marine Geology*, 438, 106540.
- ASHMOLE, N.P. The biology of the Wideawake or Sooty Tern *Sterna fuscata* on Ascension Island. *Ibis*, v. 103, p. 297–364, 1963.
- ASLAM, M., & KENCH, P. S. Reef island dynamics and mechanisms of change in Huvadho Atoll, Republic of Maldives, Indian Ocean. *Anthropocene*, 18, 57-68, 2017.
- BAATZ, M., HOFFMANN, C., & WILLHAUCK, G. Progressing from object-based to object-oriented image analysis. In: Blaschke, T., Lang, S., Hay, G.J. (eds), **Object-Based Image Analysis**, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Berlin: Springer, 29-42, 2008.
- BARNETT, J. Titanic states? Impacts and responses to climate change in the Pacific Islands. *Journal of International Affairs*, 203-219, 2005.
- BEETHAM, E., KENCH, P. S., & POPINET, S. Future reef growth can mitigate physical impacts of sea-level rise on atoll islands. *Earth's Future*, 5(10), 1002-1014, 2017.
- BELLINI, C., MARCOVALDI, M. A., SANCHES, T. M., GROSSMAN, A., & SALES, G. Atol das Rocas biological reserve: second largest Chelonia rookery in Brazil. *Marine Turtle Newsletter*, 72(1), 1-2, 1996.
- BERR, T., DIAS, M. P., ANDRÉFOUËT, S., DAVIES, T., HANDLEY, J., LE CORRE, M., ... & VIDAL, É. Seabird and reef conservation must include coral islands. *Trends in Ecology & Evolution*. Elsevier, V. 28, 6, p. 490-494, 2023.
- BIBBY, C. J., JONES, M., & MARSDEN, S. *Bird surveys*. London: Expedition Advisory Centre, p. 1-137, 1998.
- BIRDLIFE INTERNATIONAL. *Onychoprion fuscatus*. The IUCN Red List of Threatened Species 2020: e.T22694740A168895142. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2020-3.RLTS.T22694740A168895142.en>. Accessed on 29 August 2023.
- BROOKE, S., GRAHAM, D., JACOBS, T., LITTANAN, C., MANUEL, M., & O'CONNOR, R. Testing marine conservation applications of unmanned aerial systems (UAS) in a remote MPA. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 3(4), 237-251, 2015.

- BUCKLEY, F. G., & BUCKLEY, P. A. Habitat selection and marine birds. In **Behavior of Marine Animals: Current Perspectives in Research. Marine Birds**. Boston, MA: Springer US, p. 69-112, 1980.
- BURGER, J., & GOCHFELD, M. Nest site selection by Laughing Gulls: comparison of tropical colonies (Culebra, Puerto Rico) with temperate colonies (New Jersey). **The Condor**, 87(3), 364-373, 1985.
- BURGER, J., & GOCHFELD, M. Nest site selection in sooty terns (*Sterna fuscata*) in Puerto Rico and Hawaii. **Colonial Waterbirds**, 31-45, 2, 1986.
- BURGER, J. O. A. N. N. A., & LESSER, F. R. E. D. Selection of colony sites and nest sites by Common Terns *Sterna hirundo* in Ocean County, New Jersey. **Ibis**, 120(4), 433-449, 1978.
- CAREY, M. J. The effects of investigator disturbance on procellariiform seabirds: a review. **New Zealand Journal of Zoology**, 36(3), 367-377, 2009.
- CARR, P. British Indian Ocean Territory Biodiversity Action Plan: Sooty Tern Prepared by Bangor University for the BIOT Administration, FCO, King Charles Street, London, 2020.
- CHABOT, D., & FRANCIS, C. M. Computer-automated bird detection and counts in high-resolution aerial images: a review. **Journal of Field Ornithology**, 87(4), 343-359, 2016.
- CHABOT, D., & BIRD, D. M. Wildlife research and management methods in the 21st century. **Journal of Unmanned Vehicle Systems**, 3(4), 137-155, 2015.
- CHEN, X., PU, H., HE, Y., LAI, M., ZHANG, D., CHEN, J., & PU, H. An Efficient Method for Monitoring Birds Based on Object Detection and Multi-Object Tracking Networks. **Animals**, 13(10), 1713, 2023.
- CHUBEY, M. S., FRANKLIN, S. E., & WULDER, M. A. Object-based analysis of Ikonos-2 imagery for extraction of forest inventory parameters. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 72(4), 383-394, 2006.
- CONNELL, J. **Islands at risk? environments, economies and contemporary change**. Edward Elgar Publishing, 2013.
- COSTA, M. B., MACEDO, E. C., & SIEGLE, E. Planimetric and volumetric changes of reef islands in response to wave conditions. **Earth Surface Processes and Landforms**, 42(15), 2663-2678, 2017.
- COSTA, M. B., MACEDO, E. C., & SIEGLE, E. Wave refraction and reef island stability under rising sea level. **Global and Planetary Change**, 172, 256-267, 2019.
- COSTA, M. B., & SIEGLE, E. Wave climate and extremes on a mesotidal atoll lagoon. **Ocean and Coastal Research**, 70, 2022.
- CROXALL, J. P., TRATHAN, P. N., & MURPHY, E. J. Environmental change and Antarctic seabird populations. **Science**, 297(5586), 1510-1514, 2002.
- CROXALL, J. P., BUTCHART, S. H., LASCELLES, B. E. N., STATTERSFIELD, A. J., SULLIVAN, B. E. N., SYMES, A., & TAYLOR, P. H. I. L. Seabird conservation status, threats and priority actions: a global assessment. **Bird Conservation International**, 22(1), 1-34, 2012.
- DAWSON, J. L. Multi-decadal shoreline morphodynamics of a shelf-edge reef island, Great Barrier Reef: Implications for future island persistence. **Geomorphology**, 392, 107920, 2021.

- DIAMOND, A. W., & DEVLIN, C. M. Seabirds as indicators of changes in marine ecosystems: ecological monitoring on Machias Seal Island. **Environmental monitoring and assessment**, 88, 153-181, 2003.
- DIAS, M. P., MARTIN, R., PEARMAIN, E. J., BURFIELD, I. J., SMALL, C., PHILLIPS, R. A., ... & CROXALL, J. P. Threats to seabirds: a global assessment. **Biological Conservation**, 237, 525-537, 2019.
- DICKINSON, W. R. Holocene sea-level record on Funafuti and potential impact of global warming on central Pacific atolls. **Quaternary Research**, 51(2), 124-132, 1999.
- EDNEY, A. J., & WOOD, M. J. Applications of digital imaging and analysis in seabird monitoring and research. **Ibis**, 163(2), 317-337, 2021.
- EINODER, L. D. A review of the use of seabirds as indicators in fisheries and ecosystem management. **Fisheries Research**, 95(1), 6-13, 2009.
- ELLIS, J. C. Marine birds on land: a review of plant biomass, species richness, and community composition in seabird colonies. **Plant Ecology**, 181, 227-241, 2005.
- ENTRINGER JR, H., & SRBEK-ARAUJO, A. C. Habitat use, non-breeding groupings and chromatic pattern in *Johngarthia lagostoma* (H. Milne Edwards, 1837)(Decapoda, Gecarcinidae) in Trindade Island, South Atlantic Ocean. **Neotropical Biology and Conservation**, 18(1), 83-95, 2023.
- FASOLA, M., & CANOVA, L. Colony site selection by eight species of gulls and terns breeding in the Valli di Comacchio (Italy). **Italian Journal of Zoology**, 58(3), 261-266, 1991.
- FISCHER, C. F., AVELAR, J. C. L., BRITO, M., GROSMAN, A., CARVALHO, D. A., CARNEIRO, C. L., & ARRUDA, M. B. **Plano de manejo para a reserva biológica Atol das Rocas**. 235p. *Ministério do Meio Ambiente/Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, Brasília, DF, Brasil, 2007.*
- FEARE, C. J., GILL, E. L., CARTY, P., CARTY, H. E., & AYRTON, V. J. Habitat use by Seychelles sooty terns *Sterna fuscata* and implications for colony management. **Biological Conservation**, 81(1-2), 69-76, 1997.
- FEARE, C. J. The breeding of the Sooty Tern *Sterna fuscata* in the Seychelles and the effects of experimental removal of its eggs. **Journal of Zoology**, 179(3), 317-360, 1976.
- FEARE, C. J., JAQUEMET, S., & LE CORRE, M. An inventory of Sooty Terns (*Sterna fuscata*) in the western Indian Ocean with special reference to threats and trends. **Ostrich-Journal of African Ornithology**, 78(2), 423-434, 2007.
- FLOOD, P. *Cay formation*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, 2011.
- FORD, M.R., KENCH, P.S., 2016. Spatiotemporal variability of typhoon impacts and relaxation intervals on Jaluit Atoll, Marshall Islands. **Geology**, 44, 159–162, 2016.
- FREDERICK, P. C., HYLTON, B., HEATH, J. A., & RUANE, M. Accuracy and variation in estimates of large numbers of birds by individual observers using an aerial survey simulator. **Journal of Field Ornithology**, 74(3), 281-287, 2003.
- FURNESS, R. W. *Seabird ecology*. Springer Science & Business Media, 2012.

- GABRLIK, P., COUR-HARBO, A. L., KALVODOVA, P., ZALUD, L., & JANATA, P. Calibration and accuracy assessment in a direct georeferencing system for UAS photogrammetry. **International Journal of Remote Sensing**, 39(15-16), 4931-4959, 2018.
- GENZ, A. S., FLETCHER, C. H., DUNN, R. A., FRAZER, L. N., & ROONEY, J. J. The predictive accuracy of shoreline change rate methods and alongshore beach variation on Maui, Hawaii. **Journal of Coastal Research**, 23(1), 87-105, 2007.
- GOEBEL, M. E., PERRYMAN, W. L., HINKE, J. T., KRAUSE, D. J., HANN, N. A., GARDNER, S., & LEROI, D. J. A small unmanned aerial system for estimating abundance and size of Antarctic predators. **Polar Biology**, 38(5), 619-630, 2015.
- GONÇALVES, R. M., HOLANDA, T. F., QUEIROZ, H. A. A., SOUSA, P. H. G. D. O., & PEREIRA, P. S. (2022). Exploring RPAS potentiality using a RGB camera to understand short term variation on sandy beaches. *Catena*, 210, 105949.
- GRENZDÖRFFER, G. J. UAS-based automatic bird count of a common gull colony. *International archives of the photogrammetry, Remote sensing and spatial information sciences*, 1, 2013.
- GROOM, G., STJERNHOLM, M., NIELSEN, R. D., FLEETWOOD, A., & PETERSEN, I. K. Remote sensing image data and automated analysis to describe marine bird distributions and abundances. **Ecological Informatics**, 14, 2-8, 2013.
- HAMILTON, W. D. Geometry of the selfish herd. *Journal of Theoretical Biology*, v. 31, p. 295- 311, 1971.
- HATFIELD, J. S., REYNOLDS, M. H., SEAVY, N. E., & KRAUSE, C. M. Population dynamics of Hawaiian seabird colonies vulnerable to sea-level rise. **Conservation Biology**, 26(4), 667-678, 2012.
- HAZIN, M. C.; MACEDO, R. H. Sooty tern nesting success as a function of nest location, density and vegetation type in a neotropical Atoll. **Revista Brasileira de Ornitologia**, v.14, n.3, p.261-268, 2006.
- HUBBARD, D., GISCHLER, E., DAVIES, P., MONTAGGIONI, L., CAMOIN, G., DULLO, W. C., ... & SCHEFFERS, S. Island outlook: warm and swampy. **Science**, 345(6203), 1461-1461, 2014.
- HUGHES, B. J. **Breeding and population ecology of Sooty Terns on Ascension Island** (Doctoral dissertation, University of Birmingham), 2014.
- HUTCHINSON, A. E. **Estimating numbers of colonial nesting seabirds: a comparison of techniques**. In *Proceedings of the Colonial Waterbird Group* (Vol. 3, pp. 235-244). Waterbird Society, 1980.
- IPCC, 2019: Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M.Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A.Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. No prelo.
- IUCN Standards and Petitions Committee. 2022. Guidelines for Using the IUCN Red List Categories and Criteria. Version 15.1. Prepared by the Standards and Petitions Committee. Downloadable from <https://www.iucnredlist.org/documents/RedListGuidelines.pdf>. Acesso em 29/08/2023.

- KELLENBERGER, B., VEEN, T., FOLMER, E., & TUIA, D. 21 000 birds in 4.5 h: efficient large-scale seabird detection with machine learning. **Remote Sensing in Ecology and Conservation**, 7(3), 445-460, 2021.
- KENCH, P.S., THOMPSON, D., FORD, M.R., OGAWA, H., MCLEAN, R.F. Coral islands defy sea-level rise over the past century: Records from a central Pacific atoll. **Geology**, 2015.
- KENCH, P. S., & BRANDER, R. W. Response of reef island shorelines to seasonal climate oscillations: South Maalhosmadulu atoll, Maldives. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, 111(F1), 2006.
- KENCH, P.S. & COWELL, P.J. The Morphological Response of Atoll Islands to Sea-Level Rise. Part 2: Application of the Modified Shoreface Translation Model. **Journal of Coastal Research Special Issue 34**, 2001
- KENCH, P. S., & MANN, T. Reef island evolution and dynamics: Insights from the Indian and Pacific oceans and perspectives for the Spermonde Archipelago. **Frontiers in Marine Science**, 4, 145, 2017.
- KLEPP, S. "Small island states and the new climate change movement: the case of Kiribati" in *Routledge Handbook of the Climate Change Movement*, eds M. Dietz and H. Garrelts (London, New York: Routledge), 308–319, 2014.
- KOH, L. P., & WICH, S. A. Dawn of drone ecology: low-cost autonomous aerial vehicles for conservation. *Tropical conservation science*, 5(2), 121-132, 2012. LAZRUS, Hr. Sea change: island communities and climate change. **Annual Review of Anthropology**, v. 41, p. 285-301, 2012.
- LANDIS, J. R., & KOCH, G. G. An application of hierarchical kappa-type statistics in the assessment of majority agreement among multiple observers. **Biometrics**, 363-374, 1977.
- LAPORTE-FAURET, Q., MARIEU, V., CASTELLE, B., MICHALET, R., BUJAN, S., & ROSEBERY, D. Low-cost UAV for high-resolution and large-scale coastal dune change monitoring using photogrammetry. **Journal of Marine Science and Engineering**, 7(3), 63, 2019.
- LILLESAND, T.M., KIEFER, R.W., CHIPAN, J.W. **Remote sensing and interpretation**. 5ed. Madison: Wiley, 763p, 2004.
- LOKHANDE, V. H., GOR, B. K., DESAI, N. S., NIKAM, T. D., & SUPRASANNA, P. *Sesuvium portulacastrum*, a plant for drought, salt stress, sand fixation, food and phytoremediation. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, 33, 329-348, 2013.
- LÓPEZ, J., & MULERO-PÁZMÁNY, M. Drones for conservation in protected areas: present and future. **Drones**, 3(1), 10, 2019.
- LOWE, M. K., ADNAN, F. A. F., HAMYLTON, S. M., CARVALHO, R. C., & WOODROFFE, C. D. (2019). Assessing reef-island shoreline change using UAV-derived orthomosaics and digital surface models. **Drones**, 3(2), 44.
- MANCINI, P. L., SERAFINI, P. P., & BUGONI, L. Breeding seabird populations in Brazilian oceanic islands: historical review, update and a call for census standardization. **Revista Brasileira de Ornitologia**, 24, 94-115, 2016.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Panorama da conservação dos ecossistemas costeiros e marinhos no Brasil**. Brasília: MMA/SBF/GBA, 2010.

MCADAM, J. (ED.). *Climate change and displacement: Multidisciplinary perspectives*. Bloomsbury Publishing, 2010.

MCLEAN, R., & KENCH, P. Destruction or persistence of coral atoll islands in the face of 20th and 21st century sea-level rise?. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 6(5), 445-463, 2015.

MCLEAN, R.F.; HOLTHUS, P.F.; HOSKING, P.L.; WOODROFFE, C.D., Nanumaga, University of Auckland for UN Food and Agriculture Organisation, Auckland, NZ, Tuvalu Land Resources Survey, Island Reports, 2, 1991.

MOMBERG, M., RYAN, P. G., HEDDING, D. W., SCHOOMBIE, J., GODDARD, K. A., CRAIG, K. J., & LE ROUX, P. C. (2023). Factors determining nest-site selection of surface-nesting seabirds: a case study on the world's largest pelagic bird, the Wandering Albatross (*Diomedea exulans*). *Ibis*, 165(1), 190-203.

MYCOO, M., M.WAIRIU, D. CAMPBELL, V. DUVAT, Y. GOLBUU, S. MAHARAJ, J. NALAU, P. NUNN, J. PINNEGAR, AND O.WARRICK, 2022: Small Islands. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2043–2121, doi:10.1017/9781009325844.017.

NURSE, L., MCLEAN, R.F., AGARD, J., BRIGUGLIO, L.P., DUVAT-MAGNAN, V., PELESIKOTI, N., TOMPKINS, E., WEBB, A. **Small islands**. In: Barros, V.R., Field, C.B., Dokken, D.J., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., White, L.L. (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1613–1654, 2014.

NSW National Parks & Wildlife Services. Threatened species. Sooty tern Profile. Disponível em: <https://www.environment.nsw.gov.au/threatenedspeciesapp/profile.aspx?id=10770>, acesso em 28 de agosto de 2023.

PALE CZNY, M., HAMMILL, E., KARPOUZI, V., & PAULY, D. Population trend of the world's monitored seabirds, 1950-2010. *PloS one*, 10(6), e0129342, 2015.

PAPAKONSTANTINO, A., TOPOUZELIS, K., & PAVLOGEORGATOS, G. (2016). Coastline zones identification and 3D coastal mapping using UAV spatial data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5(6), 75.

PARSONS, M., MITCHELL, I., BUTLER, A., RATCLIFFE, N., FREDERIKSEN, M., FOSTER, S., & REID, J. B. Seabirds as indicators of the marine environment. *ICES Journal of Marine Science*, 65(8), 1520-1526, 2008.

PERRY, C. T., ALVAREZ-FILIP, L., GRAHAM, N. A., MUMBY, P. J., WILSON, S. K., KENCH, P. S., ... & JANUCHOWSKI-HARTLEY, F. Loss of coral reef growth capacity to track future increases in sea level. *Nature*, 558(7710), 396-400, 2018.

- PHILLIPS, R. A., GALES, R., BAKER, G. B., DOUBLE, M. C., FAVERO, M., QUINTANA, F., ... & WOLFAARDT, A. (2016). The conservation status and priorities for albatrosses and large petrels. **Biological Conservation**, 201, 169-183, 2016.
- PIATT, J. F., SYDEMAN, W. J., & WIESE, F. Introduction: a modern role for seabirds as indicators. **Marine Ecology progress series**, 352, 199-204, 2007.
- RATCLIFFE, N., GUIHEN, D., ROBST, J., CROFTS, S., STANWORTH, A., & ENDERLEIN, P. A protocol for the aerial survey of penguin colonies using UAVs. **Journal of Unmanned Vehicle Systems**, 3(3), 95-101, 2015.
- REYNOLDS, M. H., BERKOWITZ, P., COURTOT, K. N., & KRAUSE, C. M. **Predicting sea-level rise vulnerability of terrestrial habitat and wildlife of the Northwestern Hawaiian Islands** (No. 2012-1182). US Geological Survey, 2012.
- RUSH, G. P., CLARKE, L. E., STONE, M., & WOOD, M. J. Can drones count gulls? Minimal disturbance and semiautomated image processing with an unmanned aerial vehicle for colony-nesting seabirds. **Ecology and evolution**, 8(24), 12322-12334, 2018.
- SALIVA, J. E., & BURGER, J. Effect of experimental manipulation of vegetation density on nest-site selection in Sooty Terns. **The Condor**, 91(3), 689-698, 1989.
- SÁNCHEZ-PIÑERO, F., & POLIS, G. A. (2000). Bottom-up dynamics of allochthonous input: direct and indirect effects of seabirds on islands. **Ecology**, 81(11), 3117-3132, 2000.
- SARDÀ-PALOMERA, F., BOTA, G., VIÑOLO, C., PALLARÉS, O., SAZATORNIL, V., BROTONS, L. & SARDÀ, F. Fine-scale bird monitoring from light unmanned aircraft systems. **Ibis**, 154(1), 177-183, 2011.
- SCHREIBER, E.A., & BURGER, J. **Biology of marine birds**. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2002.
- SCHULZ-NETO, A. Aves marinhas do Atol das Rocas. Aves marinhas e insulares brasileiras: biologia e conservação. Itajaí, Editora da Univali, 266p, 169-192, 2004.
- SHOPE, J. B., STORLAZZI, C. D., & HOEKE, R. K. Projected atoll shoreline and run-up changes in response to sea-level rise and varying large wave conditions at Wake and Midway Atolls, Northwestern Hawaiian Islands. **Geomorphology**, 295, 537-550, 2017.
- SEYMOUR, A. C., RIDGE, J. T., RODRIGUEZ, A. B., NEWTON, E., DALE, J., & JOHNSTON, D. W. (2018). Deploying fixed wing Unoccupied Aerial Systems (UAS) for coastal morphology assessment and management. **Journal of Coastal Research**, 34(3), 704-717.
- SOARES, M.O., DE PAIVA, C. C., DE GODOY, T., DE BRITO SILVA, M., & DE CASTRO, C. S. S. Gestão ambiental de ecossistemas insulares: O caso da reserva biológica do atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, 10(3), 347-360, 2010.
- STONEHOUSE, B. The tropic birds (genus *Phaethon*) on Ascension Island. **Ibis**, 103, 124-161. 1962.
- STODDART, D. R., & STEERS, J. A. The nature and origin of coral reef islands. **Biology and geology of coral reefs**, 4, 59-105, 1977.
- STODDART, D. R. Coral reefs and islands and catastrophic storms. In *Applied coastal geomorphology* (pp. 155-197). Palgrave Macmillan, London, 1971.

STORLAZZI, C. D., ELIAS, E. P., & BERKOWITZ, P. Many atolls may be uninhabitable within decades due to climate change. **Scientific reports**, 5, 2015.

SUTHERLAND, W. J. **The conservation handbook: research, management and policy**. John Wiley & Sons, 2008.

TALAVERA, L., VILA-CONCEJO, A., WEBSTER, J. M., SMITH, C., DUCE, S., FELLOWES, T. E., ... & HACKER, J. Morphodynamic Controls for Growth and Evolution of a Rubble Coral Island. **Remote Sensing**, 13(8), 1582, 2021.

TEIXEIRA, D.M.; LUIGI, G. & SCHLOEMP, I.M. Aves brasileiras como presas de artrópodes. *Ararajuba* 2: 69-74, 1991.

WAIT, D. A., AUBREY, D. P., & ANDERSON, W. B. Seabird guano influences on desert islands: soil chemistry and herbaceous species richness and productivity. **Journal of Arid Environments**, 60(4), 681-695, 2005.

WAINRIGHT, S. C., HANEY, J. C., KERR, C., GOLOVKIN, A. N., & FLINT, M. V. Utilization of nitrogen derived from seabird guano by terrestrial and marine plants at St. Paul, Pribilof Islands, Bering Sea, Alaska. **Marine Biology**, 131, 63-71, 1998.

WOEHLER, E. J. Concurrent decreases in five species of Southern Ocean seabirds in Prydz Bay. **Polar Biology**, 16, 379-382, 1996.

WOODROFFE, C. D., & MCLEAN, R. F. Reef islands of the Cocos (Keeling) islands. **Atoll Research Bulletin**, 1994.

WOODROFFE, C. D., MCLEAN, R. F., SMITHERS, S. G., & LAWSON, E. M. Atoll reef-island formation and response to sea-level change: West Island, Cocos (Keeling) Islands. **Marine Geology**, 160(1-2), 85-104, 1999.

WOODROFFE, C. D. Reef-island topography and the vulnerability of atolls to sea-level rise. **Global and Planetary Change**, 62(1-2), 77-96, 2008.

WOODROFFE, C. D., & MORRISON, R. J. Reef-island accretion and soil development on Makin, Kiribati, central Pacific. **Catena**, 44(4), 245-261, 2001.

WOODROFFE, C. D., SAMOSORN, B., HUA, Q., & HART, D. E. Incremental accretion of a sandy reef island over the past 3000 years indicated by component-specific radiocarbon dating. **Geophysical Research Letters**, 34(3), 2007.

WRAY, T. JR., AND R. C. WHITMORE. Effects of Vegetation on Nesting Success of Vesper Sparrows. *Auk* 96:802-805, 1979.

WU, H., TANG, Y., ZHENG, H., ZHANG, Z., & ZHANG, X. Seabird statistics in coastal wetlands based on aerial views from drones. In 2022 3rd International Conference on Geology, Mapping and Remote Sensing (ICGMRS) (pp. 219-223). IEEE, 2022.

YAMANO, H., KAYANNE, H., & CHIKAMORI, M. An overview of the nature and dynamics of reef islands. **Global Environmental Research-English Edition-**, 9(1), 2005.

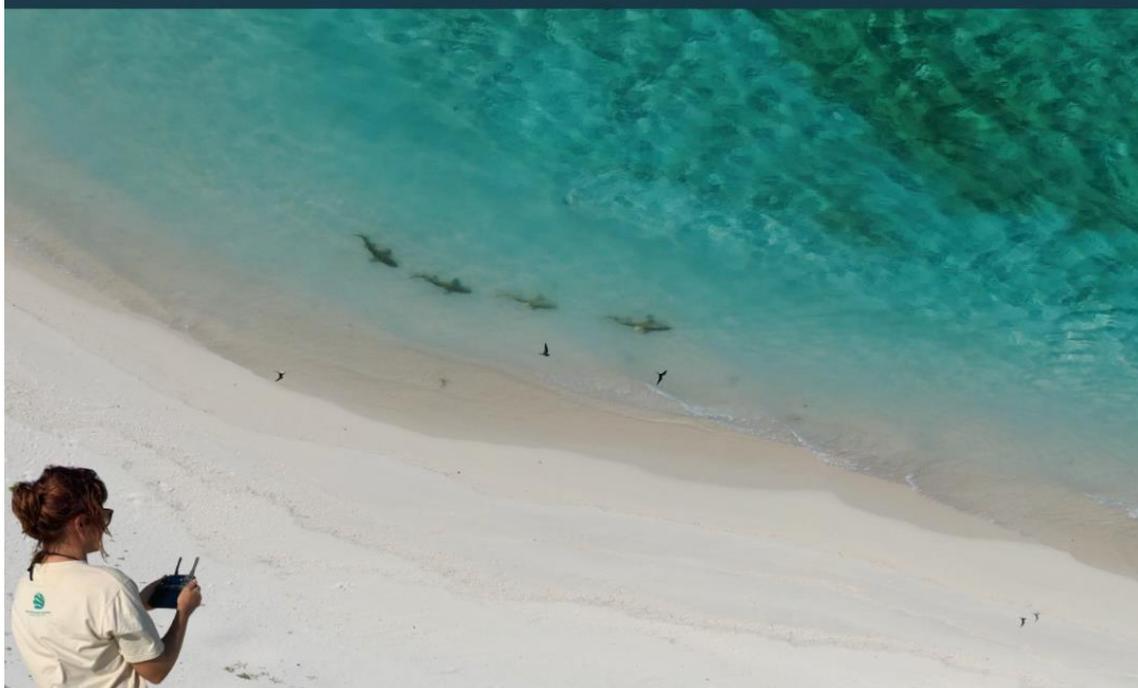
YAMANO, H., KAYANNE, H., YAMAGUCHI, T., KUWAHARA, Y., YOKOKI, H., SHIMAZAKI, H., & CHIKAMORI, M. Atoll Island vulnerability to flooding and inundation revealed by historical reconstruction: Fongafale Islet, Funafuti Atoll, Tuvalu. **Global and Planetary Change**, 57(3-4), 407-416, 2007.

**APÊNDICE A - APLICAÇÃO DE RPAS (DRONES) PARA PESQUISA,
MONITORAMENTO E FISCALIZAÇÃO EM UNIDADES DE CONSERVAÇÃO
MARINHAS: Protocolo Operacional**



APLICAÇÕES DE RPAS (DRONES) PARA PESQUISA, MONITORAMENTO E FISCALIZAÇÃO EM UNIDADES DE CONSERVAÇÃO MARINHAS

Protocolo Operacional





Aplicações de RPAS (drones) para Pesquisa, Monitoramento e Fiscalização em Unidades de Conservação Marinhas: Protocolo Operacional

Sara C.W. Siqueira¹, Tiago F. Holanda², Maurizélia B. Silva³,
Rogrido M. Gonçalves⁴, Mirella B. Costa¹

¹ Laboratório de Oceanografia Geológica, Departamento de Oceanografia,
Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco

² Laboratório de Geografia Física, Universidade Federal Fluminense

³ Reserva Biológica Atol das Rocas, Instituto Chico Mendes
de Conservação da Biodiversidade

⁴ Laboratório de Cartografia Costeira, Centro de Tecnologia
e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco

Execução

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) - Departamento de Oceanografia (DOCEAN) - LABOGEO
Instituto Chico Mendes de Conservação Brasileira (ICMBIO) - REBIO Atol das Rocas

Apoio

Fundação Grupo Boticário de Apoio à Natureza

Citação recomendada: Siqueira, S.C.W., Holanda, T.F., Silva, M.B., Gonçalves, R.M., Costa, M.B., 2023.
Aplicações de RPAS (drones) para Pesquisa, Monitoramento e Fiscalização em Unidades de Conservação
Marinhas: Protocolo Operacional. Universidade Federal de Pernambuco.



Imagem da capa: Ilha do Farol, Atol das Rocas (RN),
registrada com um Mavic 2 Zoom, DJI. Arcevo do Projeto.