



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA AMBIENTAL

CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PEDRO SMITH MENANDRO

**BACKSCATTER MULTIESPECTRAL COMO FERRAMENTA
PARA CLASSIFICAÇÃO DA GEODIVERSIDADE DO FUNDO
MARINHO**

VITÓRIA

2023

PEDRO SMITH MENANDRO



**BACKSCATTER MULTIESPECTRAL COMO FERRAMENTA
PARA CLASSIFICAÇÃO DA GEODIVERSIDADE DO FUNDO
MARINHO**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Oceanografia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Alex Cardoso Bastos (UFES).

VITÓRIA

2023

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

M534b Menandro, Pedro Smith, 1989-
BACKSCATTER MULTIESPECTRAL COMO
FERRAMENTA PARA CLASSIFICAÇÃO DA
GEODIVERSIDADE DO FUNDO MARINHO / Pedro Smith
Menandro. - 2023.
103 f. : il.

Orientador: Alex Cardoso Bastos.
Tese (Doutorado em Oceanografia Ambiental) -
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências
Humanas e Naturais.

1. Mapeamento do fundo marinho. 2. Backscatter. 3.
Classificação do fundo marinho. I. Bastos, Alex Cardoso. II.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências
Humanas e Naturais. III. Título.

CDU: 55

Pedro Smith Menandro

**“BACKSCATTER MULTIESPECTRAL COMO FERRAMENTA PARA
CLASSIFICAÇÃO DA GEODIVERSIDADE DO FUNDO MARINHO”**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental do Centro de Ciências Humanas e Naturais da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutor em Oceanografia Ambiental.

Aprovada em 31 de outubro de 2023.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Alex Cardoso Bastos (UFES)
Orientador e Presidente da Comissão

Prof^a. Dr^a. Tereza Cristina Medeiros de Araújo (UFPE)
Examinadora Externa

Prof. Dr. Luiz Antonio Pereira de Souza (IPT-SP)
Examinador Externo

Prof. Dr. Arthur Ayres Neto (UFF)
Examinador Externo

Prof. Dr. Luciano Fonseca (UnB)
Examinador Externo





Ficha de aprovação - Pedro Menandro

Data e Hora de Criação: 19/10/2023 às 16:36:55

Documentos que originaram esse envelope:

- Ficha de aprovação - Pedro Menandro.pdf (Arquivo PDF) - 1 página(s)



Hashs únicas referente à esse envelope de documentos

[SHA256]: 6882c27516334de4938183e845fdcf61ea60145f7ca771b448b77cb02883f3

[SHA512]: 52c1d36c0232ebbd5e00f221428d1dbfeb55b8c30ba04999f798ac2672c9c5b55fc0c1e602ee37d5a0d1f2237c29f54d503151cbcf3d07e9387c39e6718c3ec1

Lista de assinaturas solicitadas e associadas à esse envelope



ASSINADO - Arthur Ayres Neto (aayres@id.uff.br)

Data/Hora: 31/10/2023 - 17:07:19, IP: 200.20.12.46

[SHA256]: e52de1484bc5128bab2b99b7c8bc21bdfa28e38469d4414a6d56dd07db86f492



ASSINADO - Alex Cardoso Bastos (alex.bastos@ufes.br)

Data/Hora: 31/10/2023 - 17:20:34, IP: 187.36.148.254

[SHA256]: f82d8bdb307cfd735bff8c16495681e19c39fc9d4ac52980f92875b6b0aee316



ASSINADO - Luciano Fonseca (luciano.unb@gmail.com)

Data/Hora: 31/10/2023 - 17:20:28, IP: 188.63.100.38, Geolocalização: [47.3412793, 8.5252506]

[SHA256]: 781a9dbe9b7de3ee36c31abfb9667925052b20233b77172c60f3bd200703c9b4



ASSINADO - Luiz Antonio Pereira de Souza (luizlaps@gmail.com)

Data/Hora: 31/10/2023 - 17:07:30, IP: 177.188.201.227, Geolocalização: [-23.574493, -46.738187]

[SHA256]: a01c62b92fa8242c49fc07292f286a79c288e4994e87a26d2ad560a661335d6b



ASSINADO - Tereza Cristina Medeiros de Araújo (tereza.araujo@ufpe.br)

Data/Hora: 31/10/2023 - 17:07:17, IP: 179.190.147.36

[SHA256]: dd3148f2725f44d877366b3425526ebe12b0ef0fadd7b32ae1f64ee8c1bdaa5a

Histórico de eventos registrados neste envelope

31/10/2023 17:20:34 - Envelope finalizado por alex.bastos@ufes.br, IP 187.36.148.254

31/10/2023 17:20:34 - Assinatura realizada por alex.bastos@ufes.br, IP 187.36.148.254

31/10/2023 17:20:28 - Assinatura realizada por luciano.unb@gmail.com, IP 188.63.100.38

31/10/2023 17:09:13 - Envelope visualizado por alex.bastos@ufes.br, IP 187.36.148.254

31/10/2023 17:07:30 - Assinatura realizada por luizlaps@gmail.com, IP 177.188.201.227

31/10/2023 17:07:19 - Assinatura realizada por aayres@id.uff.br, IP 200.20.12.46

31/10/2023 17:07:17 - Assinatura realizada por tereza.araujo@ufpe.br, IP 179.190.147.36

31/10/2023 17:07:13 - Envelope visualizado por luizlaps@gmail.com, IP 177.188.201.227

31/10/2023 17:07:12 - Envelope visualizado por luciano.unb@gmail.com, IP 188.63.100.38

31/10/2023 17:07:08 - Envelope visualizado por aayres@id.uff.br, IP 200.20.12.46

31/10/2023 17:07:08 - Envelope visualizado por tereza.araujo@ufpe.br, IP 179.190.147.36

31/10/2023 14:02:49 - Envelope registrado na Blockchain por notificacao@astenassinatura.com.br

31/10/2023 14:02:48 - Envelope encaminhado para assinaturas por notificacao@astenassinatura.com.br

19/10/2023 16:36:55 - Envelope criado por juliana.coan@ufes.br, IP 200.137.65.100

Agradecimentos

O trabalho foi realizado com suporte da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), com a concessão da bolsa para o período de doutorado sanduíche (no âmbito do PDSE 19/2020 – Código de Financiamento 001), que foi essencial para o desenvolvimento do trabalho. A coleta dos dados foi viabilizada no âmbito do Projeto de Monitoramento da Biodiversidade Aquática/FEST. Meus sinceros agradecimentos a Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental (PPGOAm).

Agradeço imensamente ao meu orientador Alex Bastos por todas as oportunidades únicas que certamente extrapolaram meu merecimento, por acreditar no meu trabalho, pelas orientações e suporte na condução do doutorado sem as quais o trabalho não estaria completo, pela amizade e pelo exemplo e inspiração que ele representa não só na ciência.

Agradeço ao meu supervisor durante o período sanduíche, Dr. Craig Brown, que proporcionou uma experiência excepcional em termos científicos, de trabalho e de vida, além de ter tornado toda parte burocrática um processo simples e suave. Agradeço a todos que de alguma maneira contribuíram para esse período no SEAM Lab – Seascape Ecology and Mapping (Departamento de Oceanografia da Dalhousie University, Halifax, Canadá).

Muito obrigado também ao Ben Misiuk, que me ajudou enormemente a sair da zona de conforto de maneira tranquila, por todas as ideias, ajudas e revisões que foram essenciais para o desenvolvimento do trabalho.

A todos os colegas e amigos do Labogeo, que tornam a convivência cotidiana leve e produtiva, em especial aos mais próximos desse trabalho pelas discussões e disponibilidade (Marcos Daniel, Fernanda, Ana Carolina, Geandré, Kyssyanne), e a Valéria que está sempre pronta para ajudar, e que, juntamente com Alex, guia o laboratório com tantas linhas de pesquisa de maneira exemplar, sem enlouquecer, sempre olhando para frente e sempre demonstrando o valor da ciência.

Ao meu pai e minha mãe, que são inspirações e sempre apoiam e acreditam. Minhas irmãs queridas pelo suporte e por sempre acreditarem em mim. Agradeço também pela família que a vida me presenteou, meu sogro e cunhado. E claro, muita gratidão a minha sogra Inês Altoé que sempre incentivava, acreditava, e tornava tudo mais fácil, mas que agora está só na lembrança e iluminando o caminho à sua maneira.

À minha esposa Tarcila, que além de amor e carinho, não mede esforços para o apoio diário, de incentivo para sair da zona de conforto e de inspiração. Como se não bastasse, fez com que fosse possível acabar um doutorado passando por uma pandemia e ainda trazendo ao mundo nesse período a dupla da minha vida: Cecília e Vicente.

Não poderia deixar de dedicar a conquista que essa tese representa aos meus pequenos, Cecília e Vicente, que tanto me ensinam, me motivam e me fazem melhor todos os dias.

*“Aperfeiçoando o imperfeito
Dando um tempo, dando um jeito
Desprezando a perfeição”
Gilberto Gil*

Resumo

O ramo da ciência no qual o mapeamento do fundo marinho está inserido vem ganhando importância nas últimas décadas, acompanhando demandas associadas a inúmeros usos e propósitos da sociedade, além da relevante evolução da tecnologia. Na atualidade, estamos próximos de atingir a metade da Década da Ciência Oceânica, mas ainda bem distantes de alcançar uma das propostas prioritárias que inclui um atlas dos oceanos, não apenas com informações batimétricas, mas que envolva mapas temáticos compreensíveis com diversas variáveis e aplicável para diversos fins. Nesse contexto, as técnicas de análise, cada vez mais robustas e complexas dentro desse campo interdisciplinar que é o mapeamento do fundo marinho, têm contribuído para aprimorar o conhecimento dos oceanos com base em diferentes variáveis, mas principalmente aquelas derivadas da profundidade e do backscatter. O backscatter, apesar de ainda subaproveitado em diversas ocasiões, é basicamente conceituado como a energia acústica que retorna para o equipamento após uma série de interações e processos físicos (com a coluna d'água e com o fundo marinho), e vem consolidando sua relevância como ferramenta para produção de indicadores de propriedades físicas do fundo marinho, podendo ser analisado sob diferentes abordagens – análise baseada na imagem (mosaicos) e análise baseada da resposta angular. Esse dado acústico é coletado de maneira simultânea com a batimetria, e vem ganhando protagonismo em diversos esquemas de classificação, alimentando modelos preditivos e contribuindo para interpretação da paisagem marinha e sua geodiversidade. Mais recentemente (de 8 anos para cá), alguns trabalhos envolvendo backscatter em múltiplas frequências começaram a ser desenvolvidos na literatura científica, apoiando-se na mesma lógica que utiliza o sensoriamento remoto terrestre de que múltiplas bandas permitem um maior poder de discriminação da superfície analisada. Assim, esse trabalho explora dados coletados com um ecobatímetro multifeixe de backscatter multiespectral (frequências de 170 kHz, 280 kHz, 400 kHz e 700 kHz) em diferentes tipos de fundo, buscando compreender como é a resposta acústica de acordo com a frequência e o fundo, e aprimorar a classificação do fundo marinho a partir da aplicação de diferentes abordagens de análise e modelos de classificação. A estrutura do trabalho busca apresentar inicialmente o conceito e o potencial que o backscatter possui para classificação do fundo marinho (capítulos 1 e 2), aplicações em diferentes tipos de fundo considerando morfologia e material (areia, lama, fundos de rodolitos) utilizando múltiplas abordagens e métodos para classificar o fundo marinho e indicar possíveis vantagens e desvantagens (capítulos 3 e 4), e mostrar um panorama do atual estado de desenvolvimento científico do backscatter como ferramenta para classificação do fundo marinho. Esse trabalho contribui com um dos temas-chave – backscatter multiespectral – convencionalmente definido para estudos de backscatter por diversos grupos ao redor do mundo, além de outras questões como combinação de abordagens complementares para análise do backscatter, técnicas de *machine-learning* aplicadas ao estudo dos oceanos, mapeamento e classificação de habitat para múltiplos propósitos, mapeamento de rodolitos e mapeamento da geodiversidade no Estado do Espírito Santo.

Palavras-chave: backscatter multiespectral; classificação do fundo marinho; mapeamento do fundo marinho; multifeixe.

Abstract

The scientific field in which seabed mapping is inserted has been assuming increasingly greater importance in recent decades, following the demands associated with numerous uses and purposes in society, as well as the relevant evolution of technology. Currently, we are coming up to the halfway point of the Ocean Science Decade, but still a long way from achieving one of its priority targets, which encompasses an atlas of the oceans, not just with bathymetric information, but also with understandable thematic maps with multiple variables that can be used for several purposes. In this context, increasingly robust and complex analysis techniques used in this interdisciplinary field of seabed mapping have contributed to improving our knowledge about the ocean based on different variables, most notably those derived from depth and backscatter. Acoustic backscatter, although still somewhat underused on many occasions, is basically defined as the acoustic energy that returns to the equipment after a number of physical interactions and processes (with the water column and the seabed). It has yielded outstanding results as indicative of the seabed's physical properties and can be analysed using different approaches - image-based analysis (mosaics) and angular response-based analysis. The acoustic backscatter is collected synchronously with the bathymetric data, and has played a key role in various classification schemes, inputting predictive models and contributing to the interpretation of the marine landscape and its geodiversity. More recently (around 8 years ago), some studies involving multi-frequency backscatter have begun to be published in the scientific literature, based on the same thinking used in terrestrial remote sensing - that multiple bands allow for greater discrimination of the surface being analysed. This work, therefore, explores data collected with a multibeam multispectral backscatter echo sounder (frequencies of 170 kHz, 280 kHz, 400 kHz, and 700 kHz) on different seabed types, aiming to understand how the acoustic response behaves according to frequency and seabed, and to improve seabed classification by applying different analysis approaches and classification models. The structure of the thesis sets out to initially present the concept and potential of backscatter for seafloor classification (chapters 1 and 2), applications in different seabed types considering morphology and substrate (sand, mud, rhodolith beds) using different approaches and methods to classify the seabed and indicate possible advantages and disadvantages (chapters 3 and 4), in addition to providing an overview of the state of the art regarding the scientific development of backscatter as a tool for seabed classification. This work addresses one of the key themes - multispectral backscatter - conventionally defined for backscatter studies by diversified groups around the world, as well as other topics such as combining complementary approaches to analysing backscatter, machine-learning techniques applied to the study of the oceans, mapping and classifying habitats for multiple purposes, mapping rhodoliths and mapping geodiversity in the state of Espírito Santo.

Keywords: multispectral backscatter; seabed classification; seafloor mapping; multibeam.

Sumário

<i>CAPÍTULO 1</i>	14
1. BACKSCATTER: CONCEITO, ABORDAGENS DE ANÁLISE E APLICAÇÃO.....	14
2. LACUNAS ATUAIS E CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO.....	16
3. PROPÓSITO DA PESQUISA E ESTRUTURAÇÃO DA TESE.....	17
REFERÊNCIAS.....	18
<i>CAPÍTULO 2</i>	20
1. INTRODUÇÃO.....	21
2. METODOLOGIA.....	24
3. RESULTADOS.....	26
3.1. Evolução temporal do mapeamento do fundo marinho.....	26
3.2. O mapeamento do fundo marinho nas duas últimas décadas.....	31
3.3. Importância, aplicabilidade e direções futuras do mapeamento do fundo marinho.....	35
4. CONCLUSÕES.....	37
REFERÊNCIAS.....	38
<i>CAPÍTULO 3</i>	42
1. INTRODUÇÃO.....	43
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
2.1. Aquisição e processamento dos dados.....	45
2.2. Análise do backscatter multiespectral.....	47
2.2.1. Análise baseada na imagem.....	48
2.2.2. Análise da variação angular (Angular Range Analysis – ARA).....	48
2.3. Density-based clustering.....	49
2.4. Verdade de campo.....	50
3. RESULTADOS.....	51
3.1. Batimetria multiespectral.....	51
3.2. Backscatter multiespectral.....	52
3.2.1. Análise baseada na imagem.....	52
3.2.2. Análise da variação angular.....	57
3.3. <i>Density-based clustering</i>	59
3.4. Granulometria.....	61
4. DISCUSSÃO.....	63
4.1. Classificação e predição bêntica.....	63
4.2. Explorando a resposta do backscatter multiespectral através da análise baseada na imagem e ARA.....	64

5. CONCLUSÃO.....	67
REFERÊNCIAS.....	68
<i>CAPÍTULO 4.....</i>	<i>72</i>
1. INTRODUÇÃO.....	73
2. METODOLOGIA.....	75
2.1. Aquisição e processamento dos dados.....	76
2.2. Aquisição e processamento dos dados de verdade de campo.....	77
2.3. Classificação SVM (Support Vector Machine).....	77
3. RESULTADOS.....	78
3.1. Imagens do fundo marinho.....	78
3.2. Mapeamento do backscatter multiespectral.....	80
3.3. Classificação SVM.....	82
4. DISCUSSÃO.....	84
4.1. Vantagens do backscatter multiespectral.....	85
4.2. Resposta acústica multiespectral de fundos de rodolito.....	86
5. CONCLUSÃO.....	88
REFERÊNCIAS.....	89
<i>CAPÍTULO 5.....</i>	<i>92</i>
1. BACKSCATTER COMO VARIÁVEL ESSENCIAL EM ESTUDOS DE GEODIVERSIDADE.....	92
2. PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES CONTEXTUALIZADAS AO CENÁRIO CIENTÍFICO INTERNACIONAL DE BACKSCATTER.....	93
3. PANORAMA ATUAL DO BACKSCATTER MULTIESPECTRAL E AS PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES ALCANÇADAS.....	96
4. PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS E DESAFIOS.....	100
REFERÊNCIAS.....	101

Lista de Figuras

Capítulo 1:

Figura 1-1: Esquema ilustrativo demonstrando o fluxo i) emissão dos feixes; ii) interação com o fundo; iii) retorno da energia acústica para o equipamento e interpretação acerca do material. Imagem gentilmente cedida pelo SEAM – Seascapes Ecology and Mapping Lab/Dalhousie University..... 15

Figura 1-2: Esquema representando a operação da coleta de backscatter com múltiplas frequências em *pings* sequenciais. Fonte: Adaptado de Brown et al, 2019..... 16

Capítulo 2:

Figura 2-1: Imagens do livro de Maury (1855) com informações de profundidades (no mapa superior, unidade em “braçadas” – Fathoms) e perfil batimétrico (unidade vertical em pés) saindo da América do Norte (México) passando por Yucatan, Cuba, Haiti, Porto Rico, Atlântico Norte e chegando na África Ocidental (região de Senegal e Gâmbia). Fonte: Maury, 1855..... 22

Figura 2-2: Esquema representando o fluxo metodológico que foi seguido. 25

Figura 2-3: Contexto de águas rasas ou profundas dos trabalhos analisados por década. 27

Figura 2-4: Nuvem de palavras para cada década (período entre 1930 e 1980). 28

Figura 2-5: Nuvem de palavras para cada década (período entre 1981 e 2019). 29

Figura 2-6: Esquema ilustrativo destacando os termos mais frequentes para cada década nos estudos de mapeamento do fundo marinho. 31

Figura 2-7: Gráfico de similitude com os termos mais frequentes no período entre 2001-2010. Note que as cores são usadas para representar a clusterização, e não o valor de similaridade. Quando maior a palavra e o símbolo circular associado, maior é a frequência de ocorrência de tal palavra. A espessura das conexões cinzas entre as palavras representa o quão frequente elas aparecem relacionadas uma à outra, isto é, a co-ocorrência dos termos. 32

Figura 2-8: Gráfico de similitude com os termos mais frequentes no período entre 2011-2019. Note que as cores são usadas para representar a clusterização, e não o valor de similaridade. Quando maior a palavra e o símbolo circular associado, maior é a frequência de ocorrência de tal palavra. A espessura das conexões cinzas entre as palavras representa o quão frequente elas aparecem relacionadas uma à outra, isto é, a co-ocorrência dos termos. 33

Figura 2-9: Composição de nuvens de palavras para cada ano na última década. 34

Capítulo 3:

Figura 3- 1: Mapa da área de estudo (batimetria da Plataforma Continental adaptada de Bastos et al, 2015), com teor de areia estimado por Quaresma et al (2015). No canto inferior direito, um esquema ilustrativo da aquisição de MBES multiespectral indicando os pings sequenciais das diferentes frequências bem como o tamanho do *beam* na região central da varredura. 46

Figura 3-2: Fluxo metodológico das etapas seguidas durante a análise dos dados. 48

Figura 3-3: Fluxo metodológico indicando as etapas seguidas. O esquema ilustrativo da etapa 5 foi adaptado de Hahsler et al (2019). 50

Figura 3-4: a) Modelo digital batimétrico; b) perfil batimétrico; c) mapa de inclinação; d) mapa de rugosidade. 51

Figura 3-5: Superfícies das diferenças batimétricas computadas a partir da subtração dos modelos batimétricos para cada frequência. 52

Figura 3-6: Mosaicos de backscatter para cada frequência. 53

Figura 3-7: Perfis dos valores de backscatter comparando a resposta das diferentes frequências. O perfil da parte superior cruza toda a área de estudo, enquanto o inferior detalha um trecho sobre a feição de alto backscatter.....	54
Figura 3-8: <i>Violin plot</i> apresentando os valores de backscatter para cada frequência a) na área inteira; b) na região de cobertura da frequência de 700 kHz.....	55
Figura 3-9: Resultados do parâmetro variância extraídos dos mosaicos a partir do script GLCM.	56
Figura 3-10: Imagem de banda composta (RGB) combinando as três frequências principais do levantamento A) para toda a área de estudo; B) enquadramento aproximando uma região específica da feição de alto backscatter. Os pixels foram ajustados para representar a variação dos valores mínimo e máximo de cada banda, e nenhuma alteração de parâmetros para renderizar as cores foi aplicada (<i>hue, saturation e contrast</i>).	57
Figura 3-11: Resultados da análise da variação angular obtidos a partir da extração dos valores corrigidos de backscatter para cada setor angular.	58
Figura 3-12: Curvas da resposta angular para cada frequência extraídas nas coordenadas das estações amostrais.	59
Figura 3-13: Gráfico com os agrupamentos considerando: A) dois clusteres principais (<i>reachability distance</i> = 0.88) e ruídos; B) clusteres detalhados (<i>reachability distance</i> = 0.475).	60
Figura 3-14: A) Mapeamento com a predição de classes com base nos resultados do <i>density-based clustering</i> considerando duas classes principais; B) mapeamento a um nível de detalhe hierárquico mais refinado; C) resultados granulométricos sobrepostos à predição das classes; D) resultados de cada fração granulométrica para cada estação amostral; E) foto de sedimento arenoso (DOCE 07); F) foto de sedimento mais fino (DOCE 10).....	61

Capítulo 4:

Figura 4-1: Mapa da área de estudo destacando os três polígonos onde foram conduzidas as análises.	75
Figura 4-2: a) Mapa com as estações amostrais classificadas; b) exemplos de imagens obtidas em cada classe (nas quais as curvas de resposta angular foram extraídas – ver Figura 5 Seção 4.3.2); c) gráfico delimitando os intervalos de cobertura com os dados obtidos das verdades de campo.	79
Figura 4-3: Mosaicos de backscatter (individuais para cada frequência e o RGB de banda composta) para cada área.	80
Figura 4-4: Perfis dos valores de backscatter cruzando dois diferentes vales evidenciando respostas acústicas distintas.	81
Figura 4-5: Curvas da resposta angular extraídas para cada frequência em estações representativas das quatro classes de fundo (Classe 1 – APA 95, Classe 2 – APA 05, Classe 3 – APA 07, Classe 4 – APA 23).	81
Figura 4-6: Modelos preditos a partir da classificação SVM treinados com base em: a) presença ou ausência de rodolitos; b) quatro classes de acordo com a cobertura de rodolitos no fundo marinho utilizando como input os mosaicos de cada frequência individualmente (monocromáticos); c) quatro classes utilizando como input o mosaico multiespectral RGB.	82

Capítulo 5:

Figura 5-1: Mapa de anamorfose considerando artigos de backscatter no período entre 2017-2019 e 2020-2022.....	95
--	----

Lista de Tabelas

Capítulo 3

Tabela 3- 1: Características de cada cluster. 62

Capítulo 4

Tabela 4-1: Valores médios de backscatter e desvio padrão (SD) extraídos de cada classe para cada frequência..... 83

Tabela 4-2: Métricas de acurácia extraídas dos resultados de cada modelo de classificação. 83

Tabela 4-3: Matrizes de confusão considerando: a) presença ou ausência de rodolitos; b) modelos de quatro classes baseados na frequência de 170 kHz (que exibiu o maior valor de acurácia) e o multiespectral. 84

Tabela 4-4: Estudos relacionados ao mapeamento acústico de rodolitos listando os principais achados e as respectivas abordagens empregadas..... 87

Capítulo 5

Tabela 5-1: Literatura científica relacionada a backscatter multiespectral 96

Tabela 5-2: Resposta acústica de diferentes tipos de fundo investigados nesse trabalho. 99

CAPÍTULO 1

Introdução e estrutura da tese

1. BACKSCATTER: CONCEITO, ABORDAGENS DE ANÁLISE E APLICAÇÃO

O mapeamento da geodiversidade do fundo marinho vem sendo desenvolvido ao longo do tempo com caráter essencialmente interdisciplinar, cobrindo um leque de disciplinas como acústica, ecologia, geografia, geologia, geomorfologia e processamento de imagem/sinal. Os desdobramentos e aplicações surgem como resposta a múltiplas necessidades que envolvem diferentes ramos da ciência, e diversos outros propósitos como navegação, conservação de habitats e espécies, mudanças climáticas, poluição, pesca, engenharia, exploração de recursos minerais. Assim como diversas outras áreas, a influência que o avanço tecnológico exerceu e permanece exercendo sob o mapeamento do fundo marinho é marcante, com o desenvolvimento de diferentes técnicas para coleta de dados diretos e remotos, equipamentos que utilizam diferentes tipos de métodos e geram diferentes tipos de dados (ex.: perfilagem sísmica, sonar de varredura lateral, batimetria monofeixe e multifeixe) com objetivos e resoluções distintas, além de softwares e modelos cada vez mais complexos e completos. Esse grande volume de dados disponíveis e o caráter multidisciplinar acabam alavancando também o desenvolvimento de uma série de métodos e esquemas de classificação do fundo marinho (Strong et al, 2019; Diesing et al, 2020) envolvendo diferentes conceitos relacionados a geomorfologia, geomorfometria, biótopos e habitat, que possuem aplicações importantes variando desde o fornecimento de dados de base para um monitoramento ambiental, até dados mais específicos para gestão e conservação de habitats, planejamento espacial marinho, e que contribuem com credibilidade a abordagens baseadas no ecossistema. Contudo, aceitar a importância do mapeamento do fundo marinho e a espacialidade de habitats é a parte relativamente fácil; o caminho mais difícil é desenvolver o campo de pesquisa de maneira eficiente, aplicável e replicável. Dentre os vários dados que são suportados e desenvolvidos sob fundamentos físicos para o mapeamento ou sensoriamento remoto do fundo marinho, o dado base e protagonista nessa pesquisa é o dado de backscatter acústico, mais precisamente o backscatter multiespectral de multifeixe.

A acústica tem atuação de enorme relevância em vários aspectos nas ciências oceânicas - tema bem explorado e descrito em livros como Lurton (2010), Jackson & Richardson (2007), Micallef et al (2018), e medidas associadas ao backscatter acústico ou a inversão de parâmetros acústicos em propriedades físicas do fundo marinho não são objeto de estudo tão recentes (McKinney & Anderson, 1964; Nafe & Drake, 1961; de Moustier, 1986) na história relacionada ao mapeamento do fundo marinho, mas esse fator evolutivo/histórico será mais bem abordado no Capítulo 2. No contexto dessa pesquisa, o uso da acústica é essencialmente na coleta de dados de batimetria e backscatter multifeixe utilizando múltiplas frequências, sendo assim, a introdução ao tema backscatter está direcionada para o backscatter coletado com a batimetria multifeixe.

Buscando uma complementariedade através da reunião de diferentes bibliografias que definem o conceito de backscatter (Lurton et al, 2010; Allaby, 2013; Lurton & Lamarche, 2015), o backscatter pode ser compreendido como a medida da energia acústica que retorna para o receptor do multifeixe (também amplamente referido como

multibeam - MBES) após interações complexas com o fundo marinho e com a coluna d'água – interações que dependem de diversos fatores que serão mencionados a seguir. O esquema ilustrativo da Figura 1-1 apresenta a ideia conceitual do backscatter (emissão dos pulsos sonoros, interação com fundos diferentes e retorno da energia acústica).

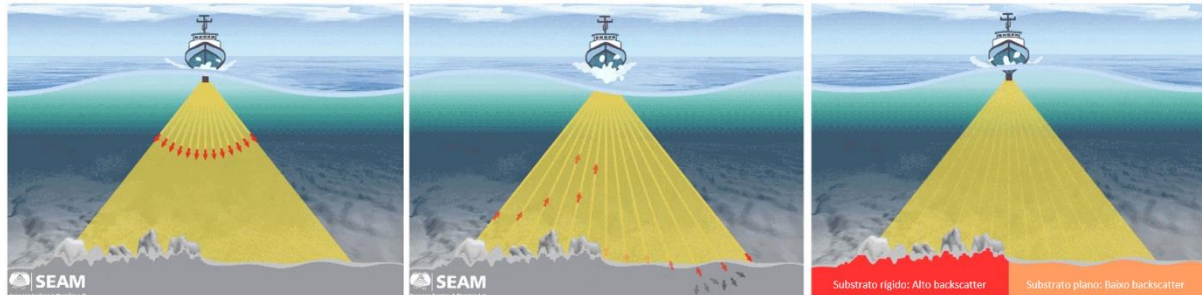


Figura 1-1: Esquema ilustrativo demonstrando o fluxo i) emissão dos feixes; ii) interação com o fundo; iii) retorno da energia acústica para o equipamento e interpretação acerca do material. Imagem gentilmente cedida pelo SEAM – Seascapes Ecology and Mapping Lab/Dalhousie University.

Diversos são os fatores que influenciam e reverberam o registro do backscatter (Lurton, 2002; Lurton & Lamarche, 2015; Lamarche & Lurton, 2018; Hughes Clarke, 2018; Schimel et al, 2018; Wendelboe et al, 2023), dentre os quais devem ser destacados as propriedades do fundo marinho (diferença de impedância acústica de determinado sedimento para a água), a heterogeneidade do depósito (por exemplo, bioturbação, pacotes lamosos que permitem a penetração do sinal) e a refletividade da interface – *interface scattering/roughness* (por exemplo, rugosidade, tipo de sedimento, formas de fundo e microtopografia), frequência acústica, ângulo de incidência do feixe no fundo marinho, características ao longo da coluna d'água (que interferem na velocidade do som), e outros parâmetros de configuração durante a aquisição (*absorption, gain, power, abertura angular*). Um conceito fundamental para entender o potencial do backscatter como indicador do tipo de fundo é que o sinal acústico analisado deve ser processado de modo a eliminar tudo o que não é intrínseco às propriedades do fundo marinho. Ou seja, extrair resultados da dependência angular, correção de perdas da propagação (atenuação) de acordo com o ambiente, e a correção dos parâmetros de aquisição precisam ser consideradas e processadas uma vez que não deveriam afetar a refletividade do fundo apesar de influenciarem no eco registrado. A reflexão é função do contraste de impedância acústica entre dois meios ou entre as propriedades do fundo e sub-fundo marinho, logo a resposta acústica é função não só das propriedades do fundo, mas também da frequência do pulso acústico. Portanto, após essas considerações, a medida do backscatter pode ser considerada um indicador do tipo de fundo, e prover conexões com outras áreas, e a base deste trabalho é justamente avaliar como este backscatter pode variar em função de diferentes frequências.

No entanto, apesar do conhecimento teórico sobre o assunto, ainda persistem algumas lacunas como por exemplo dados com valores de backscatter muito destoantes de acordo com variáveis que são difíceis de examinar de maneira detalhada, principalmente relacionados aos diferentes equipamentos (o que acaba envolvendo aspectos eletrônicos e patentes/caixas-pretas, isto é, dispositivos eventualmente inacessíveis), e diferentes softwares de processamento. Alguns estudos vêm sendo desenvolvidos buscando aprimorar essa questão em três frentes principais: i) comparação dos resultados após o processamento em diferentes softwares (Malik et al, 2019); ii) combinação de conjuntos de dados de backscatter para harmonização entre eles buscando um produto final

confiável e aplicável (Misiuk et al, 2020; Haar et al, 2023); iii) calibração dos valores absolutos de backscatter a partir de fontes distintas e uma área de referência (Roche et al, 2018).

Após os devidos processamentos, o backscatter geralmente é apresentado como dois produtos (imagem/mosaicos ou resposta angular), que acabam constituindo as duas abordagens de análise dos dados: análise baseada na imagem e análise da resposta angular (ARA – *Angular Range Analysis*). Os mosaicos de backscatter são mais adequados para análises texturais, segmentação e classificação de imagem, e geralmente descaracterizam parte do dado devido a fatores como sobreposição de linhas, interpolação dos dados e filtros como AVG (*Angular Varying Gain*); já a análise da resposta angular consegue reter a informação angular do registro de backscatter conforme o ângulo de incidência no fundo marinho em detrimento da representação espacial, sendo mais adequada para caracterização quantitativa dos dados, e geralmente é apresentada sob a forma de curvas de resposta angular, podendo ser trabalhadas como modelos empíricos, comparativos e modelagens estatísticas. Apesar das duas linhas de análise trabalharem com base em produtos diferentes, elas podem ser complementares e já vem corroborando o potencial de melhorar a classificação e a caracterização do fundo marinho quando trabalhadas de maneira combinada (Fonseca et al, 2009; Che Hasan et al, 2014).

Com base nesses conceitos, informações sobre processamento e métodos de abordagens, é necessário introduzir o conceito de backscatter multiespectral, que é registrado a partir de *pings* sequenciais de diferentes frequências (Figura 1-2). Desde 2015, alguns trabalhos vêm sendo desenvolvidos explorando o potencial do backscatter em múltiplas frequências (Hughes Clarke, 2015; Feldens et al, 2018), fornecendo mais informações e com isso alcançando um maior poder de discriminação do fundo marinho. As vantagens são fundamentadas no sensoriamento remoto terrestre, que, com um histórico mais longo e robusto, utiliza múltiplas bandas espectrais para mapeamento e classificação da cobertura terrestre de maneira detalhada. Possíveis desvantagens associadas ao método multiespectral estão ainda sendo investigadas para o ambiente marinho, e alguns aspectos podem representar dificuldades, tais como a resolução (uma vez que são *pings* sequenciais), harmonia na configuração de coleta para que os dados batimétricos também sejam viáveis, além do grande volume de dados coletados.

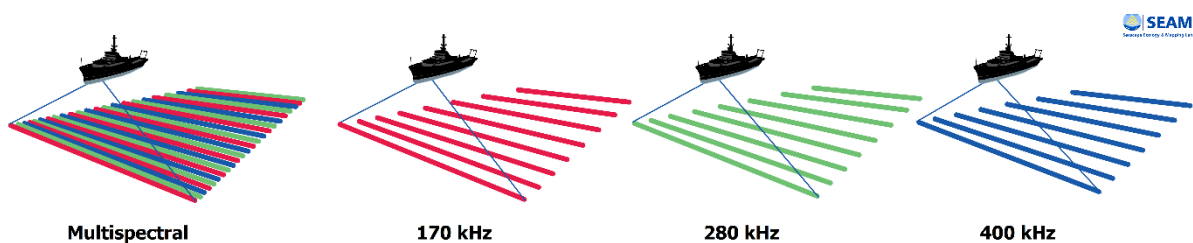


Figura 1-2: Esquema representando a operação da coleta de backscatter com múltiplas frequências em *pings* sequenciais. Fonte: Adaptado de Brown et al, 2019.

2. LACUNAS ATUAIS E CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO

Historicamente, o backscatter foi tratado como um subproduto da batimetria multifeixe, muitas vezes sendo subaproveitado ou eventualmente desconhecido e não coletado. Apesar da batimetria multifeixe ser atualmente o método mais empregado para mapeamento do fundo marinho em escala global, o backscatter ainda não ocupou um protagonismo tão visível, apesar do grande potencial para múltiplos propósitos relacionados a classificação

do fundo marinho. No Brasil, esse cenário é ainda mais evidente, sendo poucas as pesquisas que envolvem backscatter em multifeixe, com a particularidade ou dificuldade da questão de viabilidade financeira para pesquisa (isto é, pouca disponibilidade de recursos frente aos altos custos do equipamento, de coleta e de softwares de processamento). Neste sentido, a aquisição de dados de backscatter sempre foi muito mais associada ao uso do sonar de varredura lateral.

Em 2013, foi criado o *Backscatter Working Group* (BSWG) visando difundir e compartilhar informações sobre backscatter, e guiar ou direcionar importantes pautas de pesquisa sobre o tema. No ano de 2022 o grupo realizou um evento para atualização e reativação da troca de conhecimentos e direcionamentos entre os participantes (dentre os quais estão a maioria – ou todos – dos nomes mais importantes na literatura científica da área). Foi consensual listar as principais recomendações e lacunas de conhecimento acerca da pesquisa de backscatter, que são sumarizadas em: a) calibração dos dados absolutos de backscatter; b) padronização da aquisição e processamento; c) técnicas para análise e interpretação; d) dados de backscatter registrados ao longo da coluna d'água (*water column backscatter*); e) backscatter multiespectral.

Assim, a pesquisa de doutorado desenvolvida se enquadra em áreas temáticas importantes, atuais e inovadoras para o mapeamento e classificação do fundo marinho, imergindo em diferentes abordagens de análise do backscatter que forneceram resultados que serviram para diferentes modelos de classificação. Nesta tese são abordados e desenvolvidos o tema relacionado a backscatter multiespectral, envolvendo análise e interpretação utilizando técnicas de *machine-learning* aplicadas a modelos de classificação, técnicas de redução dimensional dos dados, além da análise bibliométrica que iniciou o desenvolvimento da tese.

3. PROPÓSITO DA PESQUISA E ESTRUTURAÇÃO DA TESE

O objetivo principal apresentado desde a estruturação e apresentação do projeto de pesquisa é de compreender e explorar como o backscatter multiespectral responde a diferentes tipos de fundo buscando incrementar a classificação acústica do fundo marinho. Para alcançar esses propósitos, a tese foi estruturada em três capítulos de resultados que correspondem à artigos publicados. A tese está estruturada da seguinte maneira:

Capítulo 1: Apresentar os conceitos, principais abordagens, aplicações e contextualização do trabalho.

Capítulo 2: Revisar a literatura científica buscando entender a evolução dos métodos de mapeamento do fundo marinho e como o backscatter aparece nesse contexto.

Capítulo 3: Analisar a resposta acústica multiespectral em fundos lamosos e arenosos integrando ambas as abordagens de análise (baseada na imagem e angular) para gerar uma classificação não supervisionada do fundo marinho na região adjacente a desembocadura do Rio Doce.

Capítulo 4: Analisar a resposta acústica em fundos de rodolitos, buscando diferenciar a densidade de cobertura desses nódulos utilizando uma classificação com base na assinatura multiespectral e mosaico de bandas compostas, além de quantificar a cobertura de rodolitos com base nas imagens de dropcamera.

Capítulo 5: Apresentar o panorama atual do backscatter no contexto científico, sintetizando as contribuições desse trabalho no cenário global.

Assim, a pesquisa desenvolvida demonstra a relevância do dado de backscatter e aplicações realizadas com sucesso do uso desse dado acústico (e derivadas extraídas) como variável para classificação do fundo utilizando diferentes abordagens de análise e modelos preditivos, explorando particularmente o contexto multiespectral. Os dados que serviram de base para a pesquisa foram coletados utilizando o equipamento ecobatímetro multifeixe multiespectral (fabricante R2 Sonic, modelo 2024) e amostras diretas (sedimento ou imagem/dropcam). A aquisição foi realizada no âmbito do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Marinha (PMBA) – Fest, e toda estrutura computacional e de softwares foi provida pelo Labogeo/UFES (Laboratório de Geociências Marinhas), na Universidade Federal do Espírito Santo. Vale ressaltar que foi realizado um período de doutorado sanduíche com suporte financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Capes (Edital PDSE 19/2020) sob supervisão do professor Dr. Craig J. Brown no SEAM Lab (Seascape Ecology and Mapping Lab), na Dalhousie University (Halifax/Canadá).

REFERÊNCIAS

- Allaby, Michael, org. 2013. *A dictionary of geology and earth sciences*. Fourth edition. Oxford paperback reference. Oxford: Oxford University Press.
- Brown, Craig, Jonathan Beaudoin, Mike Brissette, e Vicki Gazzola. 2019. “Multispectral Multibeam Echo Sounder Backscatter as a Tool for Improved Seafloor Characterization”. *Geosciences* 9 (3): 126. <https://doi.org/10.3390/geosciences9030126>.
- Che Hasan, Rozaimi, Daniel Ierodionou, Laurie Laurenson, e Alexandre Schimel. 2014. “Integrating Multibeam Backscatter Angular Response, Mosaic and Bathymetry Data for Benthic Habitat Mapping”. Editado por Simon Thrush. *PLoS ONE* 9 (5): e97339. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097339>.
- de Moustier, C. Beyond bathymetry: Mapping acoustic backscattering from the deep seafloor with sea beam. *J. Acoust. Soc. Am.* 1986, 79, 316–331.
- Diesing, Markus, Peter J. Mitchell, Eimear O’Keeffe, Giacomo O. A. Montereale Gavazzi, e Tim Le Bas. 2020. “Limitations of Predicting Substrate Classes on a Sedimentary Complex but Morphologically Simple Seabed”. *Remote Sensing* 12 (20): 3398. <https://doi.org/10.3390/rs12203398>.
- Feldens, Peter, Inken Schulze, Svenja Papenmeier, Mischa Schönke, e Jens Schneider Von Deimling. 2018. “Improved Interpretation of Marine Sedimentary Environments Using Multi-Frequency Multibeam Backscatter Data”. *Geosciences* 8 (6): 214. <https://doi.org/10.3390/geosciences8060214>.
- Fonseca, Luciano, Craig Brown, Brian Calder, Larry Mayer, e Yuri Rzhanov. 2009. “Angular Range Analysis of Acoustic Themes from Stanton Banks Ireland: A Link between Visual Interpretation and Multibeam Echosounder Angular Signatures”. *Applied Acoustics* 70 (10): 1298–1304. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2008.09.008>.
- Haar, Claire, Benjamin Misiuk, Vicki Gazzola, Molly Wells, e Craig J. Brown. 2023. “Harmonizing Multi-Source Backscatter Data Using Bulk Shift Approaches to Generate Regional Seabed Maps: Bay of Fundy, Canada”. *Journal of Maps* 19 (1): 2223629. <https://doi.org/10.1080/17445647.2023.2223629>.
- Hughes Clarke, J.E. 2015. Multispectral Acoustic Backscatter from Multibeam, Improved Classification Potential. In *Proceedings of the US Hydrographic Conference, National Harbor, MI, USA*, p. 18
- Hughes Clarke, John. 2018. “The Impact of Acoustic Imaging Geometry on the Fidelity of Seabed Bathymetric Models”. *Geosciences* 8 (4): 109. <https://doi.org/10.3390/geosciences8040109>.
- Jackson, D. R., and Briggs, K. B. 1992. High-frequency Bottom Backscattering: Roughness versus Sediment Volume Scattering. *J. Acoust. Soc. America* 92 (2), 962–977. doi:10.1121/1.403966
- Lamarque, Geoffroy, e Xavier Lurton. 2018. “Recommendations for Improved and Coherent Acquisition and Processing of Backscatter Data from Seafloor-Mapping Sonars”. *Marine Geophysical Research* 39 (1–2): 5–22. <https://doi.org/10.1007/s11001-017-9315-6>.

- Lurton, X. 2010. *An Introduction to Underwater Acoustics Principles and Applications*. 2nd edition. UK: Springer Praxis Books & Praxis Publishing, 346.
- Lurton, X., and Lamarche, G. 2015. *Backscatter Measurements by Seafloor-mapping Sonars. Guidelines and Recommendations*. Available at: <http://geohab.org/wp-content/uploads/2014/05/BSWG-REPORT-MAY2015.pdf>.
- Malik, Mashkoo, Alexandre C. G. Schimel, Giuseppe Masetti, Marc Roche, Julian Le Deunf, Margaret F.J. Dolan, Jonathan Beaudoin, Jean-Marie Augustin, Travis Hamilton, e Iain Parnum. 2019. “Results from the First Phase of the Seafloor Backscatter Processing Software Inter-Comparison Project”. *Geosciences* 9 (12): 516. <https://doi.org/10.3390/geosciences9120516>.
- McKinney, C. M.; Anderson, C. D. Measurements of Backscattering of Sound from the Ocean Bottom. *The Journal of the Acoustical Society of America* 1964, 36 (1), 158–163. <https://doi.org/10.1121/1.1918927>.
- Micallef, A.; Krastel, S.; Savini, A. (Eds.) 2018. *Submarine Geomorphology*; Springer Geology; Springer International Publishing: Cham, Switzerland.
- Misiuk, Benjamin, Craig J. Brown, Katleen Robert, e Myriam Lacharité. 2020. “Harmonizing Multi-Source Sonar Backscatter Datasets for Seabed Mapping Using Bulk Shift Approaches”. *Remote Sensing* 12 (4): 601. <https://doi.org/10.3390/rs12040601>.
- Nafe, J. E.; Drake, C. L. *Physical Properties of Marine Sediments*. Tech. Rep., TR-2 1961, 3, 45.
- Roche, Marc, Koen Degrendele, Christophe Vrignaud, Sophie Loyer, Tim Le Bas, Jean-Marie Augustin, e Xavier Lurton. 2018. “Control of the Repeatability of High Frequency Multibeam Echosounder Backscatter by Using Natural Reference Areas”. *Marine Geophysical Research* 39 (1–2): 89–104. <https://doi.org/10.1007/s11001-018-9343-x>.
- Schimel, Alexandre C. G., Jonathan Beaudoin, Iain M. Parnum, Tim Le Bas, Val Schmidt, Gordon Keith, e Daniel Ierodiaconou. 2018. “Multibeam Sonar Backscatter Data Processing”. *Marine Geophysical Research* 39 (1–2): 121–37. <https://doi.org/10.1007/s11001-018-9341-z>.
- Strong, James Asa, Annika Clements, Helen Lillis, Ibon Galparsoro, Tim Bildstein, e Roland Pesch. 2019. “A Review of the Influence of Marine Habitat Classification Schemes on Mapping Studies: Inherent Assumptions, Influence on End Products, and Suggestions for Future Developments”. Editado por Silvana Birchenough. *ICES Journal of Marine Science* 76 (1): 10–22. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsy161>.
- Wendelboe, Gorm; Hefner, Todd; Ivakin, Anatoliy. 2023. Observed correlations between the sediment grain size and the high-frequency backscattering strength. *JASA Express Letters*, 3 026001. <https://doi.org/10.1121/10.0017107>

CAPÍTULO 2

Mapeamento do fundo marinho: uma breve história contada a partir de palavras significativas

O capítulo 2 resultou em publicação de artigo:

- ✓ Menandro, P.S. & Bastos, A.C. 2020. "Seabed Mapping: A Brief History from Meaningful Words" *Geosciences* 10, no. 7: 273.
<https://doi.org/10.3390/geosciences10070273>



Review

Seabed Mapping: A Brief History from Meaningful Words

Pedro Smith Menandro  and **Alex Cardoso Bastos** * 

Marine Geosciences Lab (Labogeo), Departamento Oceanografia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES 29075-910, Brazil; pedromenandro@gmail.com

* Correspondence: alex.bastos@ufes.br

Received: 19 May 2020; Accepted: 7 July 2020; Published: 16 July 2020



Mapeamento do fundo marinho: uma breve história contada a partir de palavras significativas

Resumo: Ao longo dos últimos séculos, o mapeamento do fundo dos oceanos já vem despontando como um dos grandes desafios para geocientistas marinhos. O conhecimento acerca da batimetria e morfologia do fundo impactou significativamente o entendimento da dinâmica do nosso planeta. A história e as tendências científicas do mapeamento do fundo marinho podem ser avaliadas através da mineração de estudos pretéritos. Nesse capítulo, a literatura científica foi explorada utilizando o termo “seabed mapping” para investigar a evolução dos métodos de mapeamento e enfatizar as principais tendências e desafios nos últimos 90 anos. Um aumento na produção científica foi observado no início dos anos 1970, acompanhando um crescente interesse em novas tecnologias de mapeamento. Nas últimas duas décadas foi quando houve uma grande guinada em termos de produção científica de mapeamento oceânico, associadas às diversas aplicações para o mapeamento do fundo marinho, e quando termos como mapeamento de habitat, classificação do fundo e backscatter tornam-se mais frequentes. Entende-se que essa maior produção científica recente está relacionada aos investimentos em pesquisa, ciência e tecnologia, mas também associada aos interesses e demandas nacionais e internacionais acerca da zona econômica exclusiva, recursos minerais, potencial energético, necessidade de planejamento espacial marinho, além da questão das mudanças climáticas. O futuro do mapeamento do fundo marinho carrega altas expectativas, considerando que é um tema importante para a Década da Ciência Oceânica. Um novo mapa do fundo marinho em resolução mais alta pode ser tão influente e impactante para diversos campos e aplicações quanto foi o mapa de “The Floor of the Oceans” de Bruce Heezen e Marie Tharp.

1. INTRODUÇÃO

Embora os primeiros registros de estudos relacionados com o mar sejam datados da época de Aristóteles – 384-322 a.C, o início da ciência do mar geralmente é considerado datado do século 17 (Boyle – “The Saltness of the Sea”, 1699). Um dos primeiros mapas batimétricos, se não o primeiro, bem anterior a métodos geofísicos, foi baseado em profundidades (unidades em braçadas) medidas com chumbo amarrado a uma linha e publicado em 1855 no livro do oficial da Marinha americana Maury M.E. (*The Physical Geography of the Sea*) – exemplo na Figura 2-1. A história do mapeamento dos oceanos tem como um dos grandes marcos a expedição HMS Challenger, entre os anos de 1873 e 1876. Foi do “Report of The Voyage of HMS Challenger”, publicado em 1885, de onde foram retiradas várias das informações anteriores ao século 20. Mais de 500 medidas de profundidade foram coletadas nessa expedição, revelando por exemplo as profundidades nas Fossas Marianas e a cordilheira conhecida hoje como a Cordilheira Meso-Atlântica. No começo do século 20, uma importante teoria sobre as bacias oceânicas foi lançada: hipótese de Wegener abordando a deriva continental e o espalhamento oceânico. Já em 1977, outro fato relevante e histórico para o mapeamento do fundo marinho, quando Bruce Heezen e Marie Tharp contribuíram para consolidar a hipótese de Wegener e construíram um mapa da morfologia submarina de maneira similar ao que é conhecido ainda hoje.

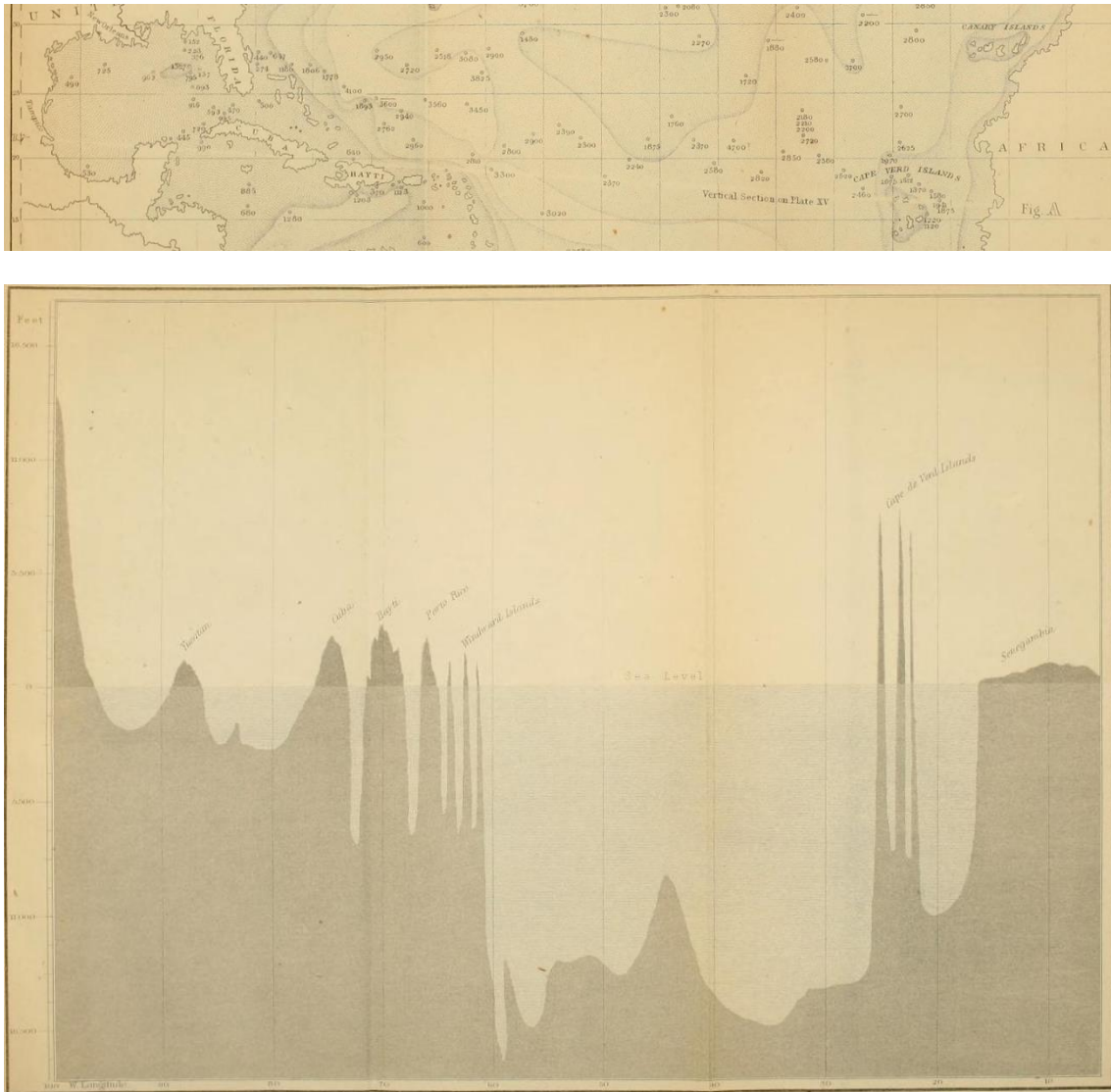


Figura 2-1: Imagens do livro de Maury (1855) com informações de profundidades (no mapa superior, unidade em “braçadas” – Fathoms) e perfil batimétrico (unidade vertical em pés) saindo da América do Norte (México) passando por Yucatan, Cuba, Haiti, Porto Rico, Atlântico Norte e chegando na África Ocidental (região de Senegal e Gâmbia). Fonte: Maury, 1855.

Antes do século 19, os métodos eram arcaicos e consistiam basicamente no sistema *lead and line*, no qual um peso era atrelado a uma corda e descia até tocar o fundo. Tais medições eram muito afetadas pela movimentação de deriva da embarcação, bem como das correntes marítimas. Algumas tentativas de desenvolver o método apareceram buscando inclusive amostragem do fundo, como Hooke do século 18 e máquina de Brooke do século 19. Paralelamente, foram criadas teorias, que poderiam ser consideradas excêntricas na atualidade, como a cobertura do fundo do mar por uma camada eterna de gelo (francês naturalista Pérou, em 1805). A operação de passagem do primeiro cabo telégrafo transoceânico, em torno de 1850, foi um acontecimento marcante que gerou necessidade de melhor conhecimento das profundidades e alavancou conhecimento científico.

A partir de 1920, com o desenvolvimento da tecnologia acústica, o método *“lead and line”* de medição de profundidades foi gradativamente substituído pelo ecobatímetro. A expedição alemã *Meteor* (1925-1927) levantou informações no oceano Atlântico utilizando uma ecosonda e outras ferramentas oceanográficas. Durante essa

expedição, entre outros resultados, a continuidade da Cordilheira Meso-Atlântica foi observada. Métodos sísmicos também foram utilizados nesse período, com os primeiros registros em áreas submersas em 1926 (eventos históricos encontrados em Sheriff & Geldart, 1955), e o primeiro levantamento marinho com metodologia sísmica conduzido em 1938 (Ewing & Vine, 1938). Entre as décadas de 1950 e 1960 avanços importantes ocorreram no desenvolvimento de estabilização eletrônica, técnicas interferométricas e melhoria de posicionamento (questões abordadas em Moustier, 1988). Na década de 1970, um novo panorama de mapeamento acústico do fundo marinho foi traçado na pesquisa científica e cartográfica devido ao revolucionário sistema batimétrico multifeixe (Glenn, 1970). Em 1977, na expedição do N.O. Jean Charcot, as primeiras versões não-militares dos sistemas multifeixe foram usados: Seabeam e Hydrochart, de águas profundas e rasas, respectivamente, mudaram os rumos de levantamentos batimétricos (Renard e Allenou, 1979; Farr, 1980), já considerando inclusive a possibilidade de determinar características do fundo a partir do backscatter (Moustier, 1985). Após o aprimoramento desses sistemas acústicos, a ciência de classificação do fundo marinho alavancou grande conhecimento, desenvolvendo excelentes ferramentas (como batimetria monofeixe, batimetria multifeixe, sonar de varredura lateral) para identificação, classificação e mapeamento da geomorfologia submarina bem como de habitats. A correlação de propriedades acústicas com parâmetros biológicos e geológicos já vem sendo bastante aproveitada nos últimos anos, mas vale ressaltar que esse tipo de inversão de propriedades acústicas em propriedades físicas iniciou junto com o uso de acústica submarina (Nafe and Drake, 1964).

Então, com o passar do tempo e o desenvolvimento tecnológico, o mapeamento do fundo marinho contribuiu por exemplo no entendimento e na formulação da tectônica de placas, espalhamento do fundo oceânico e sismicidade (Hess, 1962). Além da óbvia importância científica e essencial relação com outras áreas da oceanografia, vale destacar o papel do mapeamento do fundo marinho também discutido associado a algumas questões muito importantes estabelecidas em 1982 na Lei dos Mares pela Convenção das Nações Unidas: limites jurisdicionais e internacionais. Essa temática tem estreita relação com áreas como zoneamento econômico, planejamento/gestão de recursos naturais, e exploração de nódulos minerais. Persand (2005) fez uma revisão dos principais pontos e implicações sobre o Artigo 76 sobre a Lei dos Mares, pontuando, entre outros assuntos, a importância dos métodos geofísicos e a solicitação do Brasil para estender a área de plataforma continental (solicitação recentemente considerada, após quase 15 anos).

Ainda nos dias de hoje, é comum ouvir ou ler em tom de frustração e lamento que sabemos mais sobre a superfície da lua e de alguns outros planetas do que dos nossos próprios oceanos, e que 75% dos oceanos não são mapeados. Um exemplo que ganhou notoriedade na mídia foi o do mapeamento no oceano Índico devido à queda do avião da Malaysia Airlines, que revelou resultados desconhecidos e inesperados da geomorfologia do fundo oceânico na região (Picard et al, 2018). As afirmações alertam para a necessidade desse mapeamento por várias questões, mas também distorcem um pouco o histórico do mapeamento do fundo oceânico considerando as tecnologias disponíveis. De fato, com as técnicas de gravimetria e de satélite ainda temos severas limitações na representação do mapa global, principalmente em termos de resolução. A melhor resolução dos mapas topográficos da Lua e de outros planetas quando comparados com os do fundo oceânico traz à tona algumas questões: representação espacial de um mapa global e resolução adequada; limitações de métodos eletromagnéticos de sensoriamento remoto devido a água do mar; alto custo (em termos financeiros, temporal e computacional) para um mapeamento completo em resolução menor do que 1km. O reconhecimento da importância do mapeamento do fundo marinho

para diversas áreas é corroborado pela ambiciosa meta do “The Nippon Foundation - GEBCO Seabed 2030 Project”, além do posicionamento da UNESCO declarando a década 2021-2030 como a Década da Ciência Oceânica.

A ideia deste capítulo não é ser uma audaciosa e desafiadora revisão histórica das ciências do mar, nem tampouco do mapeamento dos oceanos, visto que isso envolveria um trabalho historiográfico enorme, resgatando aspectos associados, por exemplo, ao contexto das primeiras navegações bem como do histórico da cartografia (como bem relatado no livro de Wigal, 2007). O propósito é traçar um panorama geral sobre o mapeamento do fundo marinho, apoiando-se em bibliografia científica, para visualizar a importância e a evolução dos métodos de mapeamento do fundo marinho até a atualidade (principalmente 1930 – 2019), destacando as principais tendências e desafios, e fornecendo grande suporte para análises subsequentes. Nesse contexto, as análises apresentadas foram baseadas em um conjunto de trabalhos datados entre 1930 e 2019 encontrados Portal de Periódicos da Capes. A busca pelos trabalhos foi conduzida utilizando o termo “seabed mapping”. As investigações envolvem principalmente análise de léxico, apresentando resultados estatísticos sobre as principais e mais recorrentes temáticas no grupo de artigos ao longo das décadas. A ideia foi implementar uma importante decorrência de *machine learning* e de *data science*, na qual ocorre uma inversão na ordem em que tradicionalmente uma hipótese é originada, isto é, ao invés de idealizar uma hipótese para depois demonstrar a validade através de dados, um algoritmo analisa os dados previamente e apresenta uma série de resultados e conexões que eventualmente são difíceis de serem visualizadas individualmente (Dhar, 2013).

Antes de seguir com as análises, é importante pontuar e reconhecer que há referências de livros muito relevantes que não foram consideradas nesta análise, pois não estão necessariamente incluídas nas bases e bibliotecas consideradas. Exemplos tais como livros científicos antigos, como o inspirador *Submarine Geology* (1948), de Francis Shepard, e *The Floors of the Ocean-North Atlantic* (1959), de Bruce Heezen, Marie Tharp e Maurice Ewing. Além disso, há publicações importantes associadas a Instituições de Pesquisa e Serviço geológico/hidrográfico que não foram incluídas na análise. A importância desses órgãos é inquestionável e difícil de mensurar. Entre outras funções, na maioria das nações, esses órgãos desempenharam e ainda desempenham um papel de liderança na coleta de dados, interpretação e publicação de contribuições para as geociências (por exemplo, sustentabilidade de recursos naturais e mapeamento geológico fundamental – Otto, 1995). Uma meta importante desses levantamentos geológicos/hidrográficos é produzir as informações exigidas pelos governos para mapear os limites do zoneamento econômico e fornecer um conhecimento básico do fundo do mar para o planejamento espacial marinho nacional ou multilateral.

2. METODOLOGIA

A metodologia utilizada consiste em 3 etapas principais (Figura 2-2): i) busca de referências; ii) preparação e processamento dos arquivos de texto; iii) executar as análises estatísticas. Durante as buscas de estudos, alguns critérios de inclusão foram adotados para tornar essa etapa mais transparente e replicável (Atkinson et al, 2015), como a definição do termo chave para busca, bases de dados consideradas, restringir o período e apenas estudos escritos em inglês.

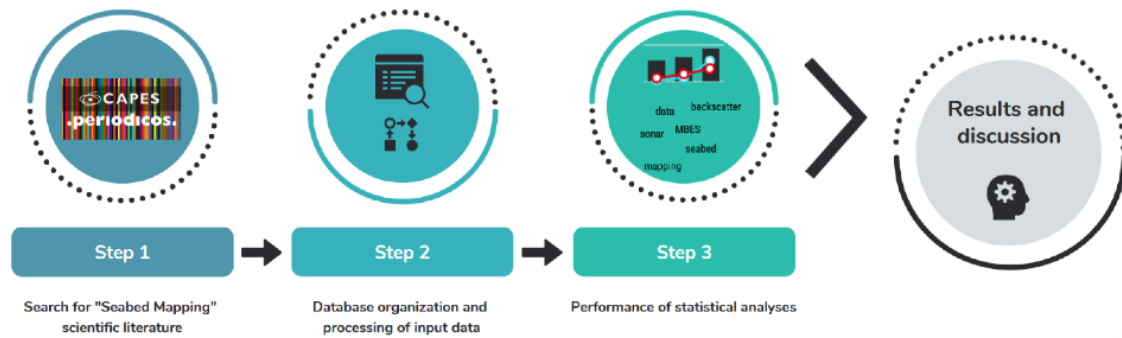


Figura 2-2: Esquema representando o fluxo metodológico que foi seguido.

A mineração de referências foi realizada no portal de trabalhos científicos Portal de Periódicos da Capes. No Portal de Periódicos da Capes estão disponíveis as seguintes coleções: Scopus (Elsevier), Science Citation Index Expanded (Web of Science), OneFile (GALE), ASFA (Aquatic Sciences and Fisheries Abstracts), Elsevier (CrossRef), Technology Research Database, Oceanic Abstracts, Engineering Research Database, Materials Science & Engineering Database, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Advanced Technologies & Aerospace Database, Springer (CrossRef), SpringerLink, Civil Engineering Abstracts, Advanced Technologies Database with Aerospace, GeoRef, Mechanical & Transportation Engineering Abstracts, Aerospace Database, Taylor & Francis Online - Journals, Wiley Online Library. Aqui novamente destaco que livros e a “literatura cinza” (como publicações de Serviços Geológicos) foram excluídas do escopo proposto para essa análise, ainda que sejam de importância reconhecida.

O termo utilizado para a busca foi *Seabed mapping*. A escolha desse termo ao invés de *seafloor mapping*, por exemplo, foi baseada no fato de que é um termo amplamente utilizado, e a definição conceitual de *seafloor* e *seabed* é muito similar. A título de exemplo para atestar a validade do termo escolhido, considerando os trabalhos selecionados para as análises desse capítulo, os termos *seabed* e *seafloor* não aparecem entre 1930 e 1940, mas sim termos como *bottom*; nos anos 1960, *ocean floor*, *seabed* e *seafloor* foram identificados três vezes; entre 2000 e 2010, *seabed* apareceu 114 vezes enquanto *seafloor* 86. Além disso, o termo escolhido faz referência ao projeto global nomeado como “Seabed 2030”. Uma busca mais abrangente considerando outras palavras-chave talvez fornecesse uma revisão ainda mais completa, mas tal esforço metodológico foi considerado inadequado e desnecessário aqui.

Foram considerados apenas artigos em inglês, e todos foram cuidadosamente avaliados quanto a temática. A triagem pode ser considerada como uma etapa um pouco subjetiva ou enviesada pela pessoa que está realizando, mas é necessária devido ao tipo de algoritmo de busca dos portais que eventualmente oferecerem trabalhos sem relação com o termo completo *Seabed mapping*, além de aparecerem alguns trabalhos de divulgação, resumos e outros tipos. Durante as buscas, o ponto de corte para triagem foram os 300 primeiros resultados, visto que após essas primeiras centenas de resultados os trabalhos já não mostravam relação próxima com o termo.

A ideia fundamental da análise de léxico é transformar as palavras, através de linguagem computacional, em fatores ou números. Dessa maneira o algoritmo consegue analisar sintaticamente, comparativamente e quantitativamente as relações encontradas nos conjuntos textuais, provendo resultados possíveis de serem comparados e mensurados.

As análises léxicas de frequência e co-ocorrência dos termos foram executadas em uma interface gráfica ancorada no ambiente R, que utiliza também alguns scripts em linguagem Python. Trata-se do Iramuteq (*Interface de R pour les analyses multidimensionnelles de textes et de questionnaires*) (Ratinaud, 2009). Com essa ferramenta é possível realizar a contagem de frequência de termos (separados em ocorrência de termos ativos e termos suplementares), criação de gráficos como nuvem de palavras, e possibilita algumas análises de co-ocorrência de termos ao longo do texto, construindo gráficos de similitude.

- - Nuvem de palavras – graficamente interessante por permitirem uma rápida e simples identificação das palavras mais frequentes (quanto mais frequente, maior o tamanho). Palavras consideradas como suplementares (pronomes, artigos e preposições) foram devidamente excluídas;
- - Gráficos de similitude, os quais são baseados na teoria usada para observar e descrever a conexão entre palavras. As análises processadas consideraram a relação e co-ocorrência entre os 100 mais frequentes termos, e o gráfico escolhido para representação foi o “Fruchterman Reingold” (padrão da ferramenta Iramuteq), que considera a espessura das conexões entre palavras para definir a dispersão dos vértices principais. Com essa configuração, quanto mais frequente duas palavras aparecerem próximas, mais grossa será a conexão.

A preparação e o processamento dos arquivos de texto são realizados para que a linguagem computacional consiga entender os dados de entrada (formato UTF-8). Dessa maneira, as principais etapas envolvidas no processamento são a retirada de caracteres especiais (acentos e pontuações) e a reconstituição de sintagmas, isto é, duas ou mais palavras com um único referente. Neste caso, substitui-se os espaços por “_” - *underline/underscore* (por exemplo, “*continental shelf*” torna-se `continental_shelf`). Importante considerar aqui que foram apenas utilizados o título, resumo e palavras-chave para as análises estatísticas. Essa opção foi definida devido ao grande volume textual a ser tratado, e pela percepção de que caso todos os artigos fossem analisados completamente a quantidade de ruídos nos resultados poderia acabar influenciando de maneira negativa o objetivo proposto.

3. RESULTADOS

A mineração de artigos a partir do termo “Seabed mapping” foi realizada com sucesso e resultou em um banco bibliográfico contendo um total de 454 artigos, datados entre 1930 e 2019. A lista completa de referências pode ser encontrada no material suplementar.

Nas seções subsequentes, os resultados são apresentados e discutidos de maneira qualitativa e quantitativa. Para isso, foram definidos três tópicos. Para o primeiro, uma análise temporal foi conduzida ao longo das décadas apoiando-se principalmente nas nuvens de palavras, e diferenciando contexto de águas rasas e águas profundas. O segundo tópico aborda a similaridade ou similitude dos termos para as últimas duas décadas (período este escolhido e considerado adequado devido a coexistência de numerosas tecnologias e abordagens/técnicas de mapeamento e classificação). O terceiro tópico cobre a importância, aplicabilidade e direções futuras do mapeamento do fundo marinho.

3.1. Evolução temporal do mapeamento do fundo marinho

A primeira análise realizada foi a verificação da área de cada estudo, isto é, se o trabalho se enquadra como de águas rasas (profundidade menor que 200 m), águas profundas (> 200 m), ou se o trabalho não se enquadra nessas

categorias (por exemplo, trabalhos com abordagens mais voltadas para revisão bibliográfica ou desenvolvimento metodológico). O gráfico da Figura 2-3 apresenta a categorização por década em termos de porcentagem.

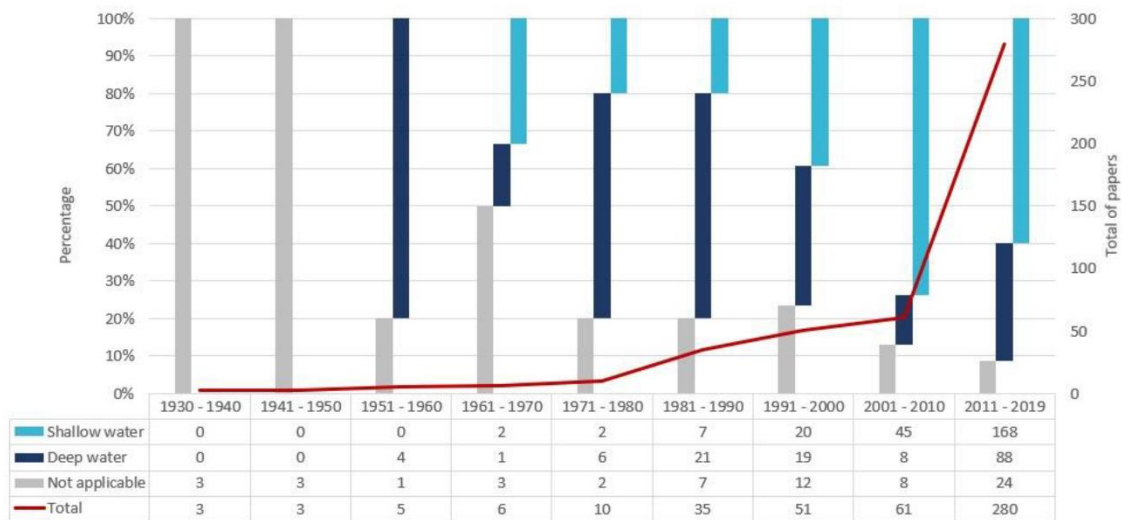


Figura 2-3: Contexto de águas rasas ou profundas dos trabalhos analisados por década.

No geral, é notável a crescente produção científica ao longo do tempo, com um salto mais visível a partir da década de 1980, e um número ainda mais expoente na década atual. Esse fato segue a tendência geral de investimentos em pesquisa ciência e tecnologia, assim como o aumento da pesquisa específica em mapeamento do fundo marinho. Recentemente, a Unesco publicou um mapa global baseado em publicações relacionadas às ciências oceânicas (IOC/Unesco, 2019), onde países como Estados Unidos, China, Canadá, vários da Europa e Austrália aparecem como protagonistas na área. Contudo, a presença marcante da China não foi observada no conjunto de artigos analisados aqui, o que pode ser atribuído a possibilidade de que muitos desses trabalhos considerados no mapa da Unesco estejam enquadrados em campos de ciências marinhas que não são correlatos ao termo *seabed mapping*, ou mesmo à disponibilidade limitada de artigos chineses nas bibliotecas virtuais consideradas para as buscas.

Ainda em relação ao crescimento da produção científica, é fundamental destacar o papel exercido por grandes programas de mapeamento. Vários deles aparecem inclusive em alguma das nuvens de palavras. Entre eles, valem as menções específicas ao General Bathymetric Chart of the Oceans – Gebco (Weatherall et al, 2015), European Marine Observation and Data Network - EDMOnet (Kaskela et al, 2019), Marine Area Database for Norwegian Waters – Mareano (Buhl-Mortensen et al, 2015), Integrated Mapping Survey for the Sustainable Developments of Ireland’s Marine Resource – INFOMAR (Sachetti et al, 2006), e Seamap Australia (Lucieer et al, 2019). Maiores informações sobre alguns desses programas e outros repositórios são sumarizadas em Wölf et al (2019).

Outra constatação interessante que pode ser extraída do gráfico é a predominância de estudos de água profunda até a década de 1980. Essa dominância fica desbalanceada nos anos 1990, e após isso é profundamente invertida, com o panorama mostrando maior número de estudos em águas rasas nas duas décadas mais recentes. A comparação direta entre décadas não é um exercício trivial, já que mudanças em diversos cenários de variáveis ocorreram, como avanço tecnológico computacional e atividades como exploração mineral e comércio portuário.

Atualmente, estudos em águas rasas ainda compõem a maioria, mas um grande número de artigos em águas profundas foi publicado ao final da década entre 2010-2019 (exemplos: Picard et al, 2018; Mulder et al, 2019; Stewart et al, 2019). Recentemente, a revista *Frontiers in Marine Sciences* publicou uma edição especial (seafloor mapping of the Atlantic Ocean) com estudos de mar profundo. Contudo, devido aos avanços e disponibilidade da tecnologia (batimetria multifeixe e veículos autônomos), esses novos estudos conseguem alcançar resultados com uma resolução muito maior do que os trabalhos mais antigos. Vale ressaltar ainda que a abordagem de mapeamento de águas profundas através de batimetria *crowd-sourced* que aparece recentemente em Novaczek et al (2019), certamente é um caminho que pode otimizar e aproveitar todo o tráfego global de embarcações para cobrir áreas não mapeadas com dados em alta resolução, e é uma ideia já apresentada desde Paisley, em 1956.

O maior número de trabalhos em águas rasas na atualidade transparece os esforços e prioridades relacionados a região costeira/plataforma continental para vários objetivos, variando de processos costeiros, estudos morfológicos e planejamento espacial marinho. Além disso, a dificuldade com recursos financeiros para viabilizar estudos em águas profundas também consiste em um entrave ainda a ser superado.

Seguindo a análise do banco bibliográfico, foram construídas as nuvens de palavras para cada década com o intuito de apresentar as mais frequentes temáticas e tentar extrair o contexto científico de cada grupo (décadas) de artigo. As Figuras 2-4 e 2-5 apresentam na forma de linha do tempo as nuvens de palavras por década.

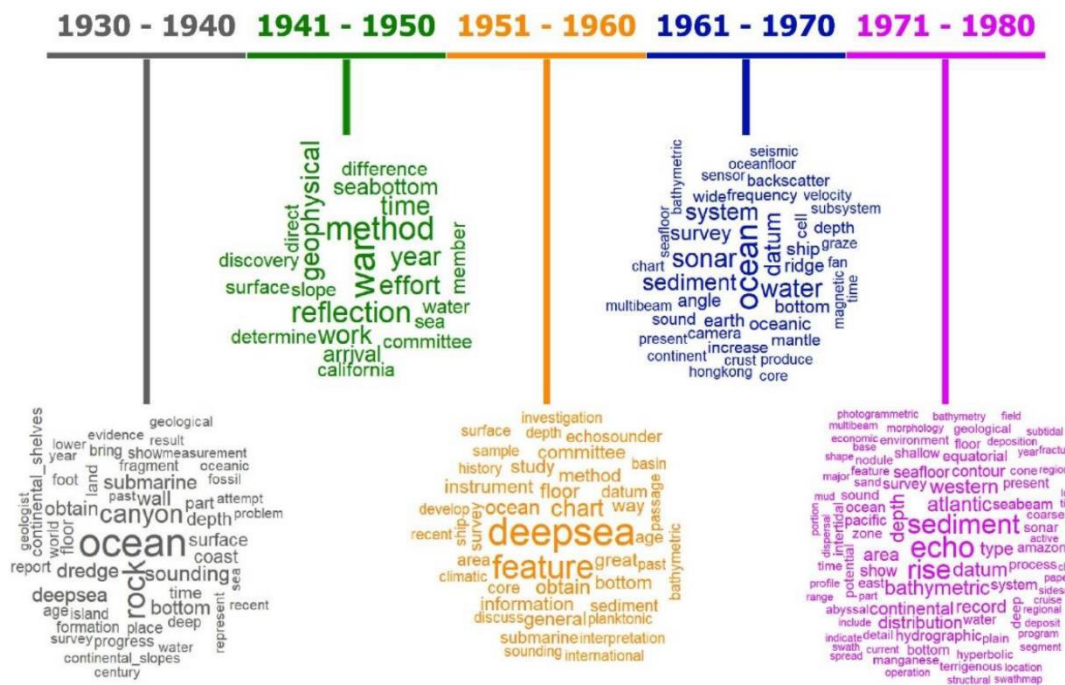


Figura 2-4: Nuvem de palavras para cada década (período entre 1930 e 1980).

propriedades sedimentológicas (Nafe et al, 1964). Além disso, entre os termos proeminentes já se possível notar a importância revolucionária do desenvolvimento de um sistema batimétrico multifeixe (Glenn, 1970).

Para a década de 1970-1980, os termos que mais apareceram foram *echo*, *rise* e *sediment*. A presença marcante da palavra *echo* foi impulsionada pelo artigo de Damuth (1975) sobre ecocaráteres no Atlântico. A ocorrência de termos como *deep* e *abyssal* corroboram a predominância de estudos em águas profundas mostrada no gráfico da Figura 2-3. Outra palavra importante para o contexto foi *seabeam*, que foi o primeiro sistema batimétrico multifeixe utilizado para fins não militares durante a expedição do N.O. Jean Charcot.

Na década de 1980-1990, conforme já mencionado na descrição do gráfico da Figura 2-3, houve um grande aumento na produção científica, o que explica a quantidade maior de termos presente na nuvem de palavras. O desenvolvimento científico pode ser inferido pela presença de termos mais técnicos (*analysis*, *technique*, *measurement*, *process*), além de termos associados a metodologias e equipamentos (*sidescan*, *backscatter*, *multibeam*, *seabeam*, *classification*, *echocharacter*). Começaram a aparecer de maneira um pouco menos desbalanceada termos associados a águas profundas (*deep*, *ridge*, *seamount*, *polymetallic*) e a águas rasas (*shallow*, *continental shelf*, *exclusive economic zone*).

Na década seguinte, entre 1990-2000, os estudos em águas rasas começaram a se sobressair (*shallow*, *shelf*, *continental shelf*). É interessante salientar a maior ocorrência da palavra *multibeam* quando comparada a *sidescan*, e a importância do termo *backscatter*. Outras palavras que trazem informação acerca do desenvolvimento científico são *resolution*, *accuracy*, *groundtruth*, *classification*, *Roxann* e *QTC View* (sendo esses dois últimos sistemas de classificação do fundo marinho). No período de 2001-2010, as palavras que mais apareceram foram *datum*, *habitat*, *map*, e *acoustic* (mesma quantidade de ocorrência), com domínios de estudos em águas rasas. Trabalhos com abordagens de conservação ambiental tornam-se mais comuns (termos como *reef*, *habitat mapping*, *marine protected area*, *ecosystem based management*).

Por fim, na década entre 2011-2019, os termos mais recorrentes foram *datum*, *map*, e *habitat*. Palavras como *backscatter* e *classification* também mostraram grande importância. No caso particular de *classification*, o desenvolvimento foi excepcional, exemplificado por termos como *algorithm* (53 vezes), *machine_learning* (34 vezes), *angular_response* (37 vezes), *geomorphometry* (23 vezes), *unsupervised* (21 vezes) e *multispectral* (31 vezes). Essa década também apresentou maior ocorrência do termo *marine_protected_area* do que na década anterior, o que é coerente com o uso crescente de mapas e mapeamento de áreas de preservação como ferramenta para delimitação, restauração ou reconstrução de recursos marinhos (Duarte et al, 2020).

A Figura 2-6 sumariza os termos mais frequentes para cada década. A palavra *datum* assume a posição da mais importante ao longo das últimas quatro décadas, o que é esperado dado o desenvolvimento científico e o aumento da quantidade, qualidade e disponibilidade de dados. Essa constatação já demonstra e traz à tona o quão desafiador vem sendo elaborar repositórios de dados, além das dificuldades associadas a compilação e harmonização de diferentes tipos de dados/levantamentos/equipamentos (conforme abordado em Misiuk et al, 2020).

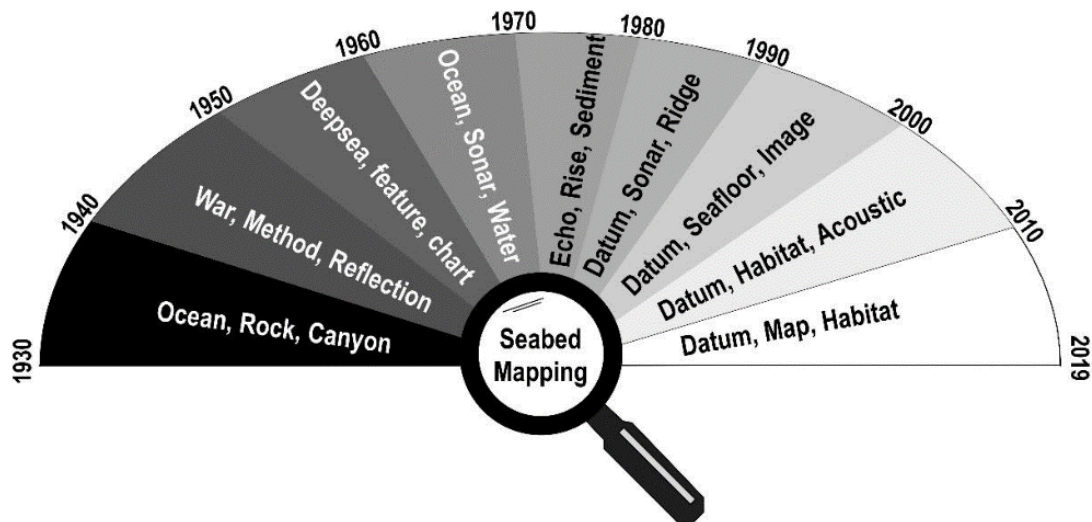


Figura 2-6: Esquema ilustrativo destacando os termos mais frequentes para cada década nos estudos de mapeamento do fundo marinho.

3.2. O mapeamento do fundo marinho nas duas últimas décadas

Para as duas últimas décadas, um maior número de publicações foi analisado e, portanto, uma maior quantidade de termos apareceu nas nuvens de palavras mostrando avanços tecnológicos e metodológicos. Durante essas décadas, sonar de varredura lateral e batimetria multifeixe protagonizam os papéis mais importantes dentre as tecnologias de mapeamento (Kenny et al, 2003). O progresso do mapeamento de habitats (ou mapeamento bêntico) foi revisado em Brown et al (2012) considerando três técnicas (monofeixe, sonar e multifeixe) em mais de 140 publicações. Já em Lecours et al (2016), um leque de abordagens geomorfométricas foi revisado e discutido para diferentes técnicas e resoluções.

Em uma tentativa de melhor visualizar e detalhar as últimas duas décadas, essa seção apresenta os gráficos de similitude. Nele constam as relações entre os termos que apareceram ao menos 100 vezes, considerando a distância euclidiana entre os termos. Além disso, gráficos de nuvem de palavra mais detalhados foram construídos para ilustrar o panorama anual da última década. Na Figura 2-7 é apresentada os resultados para a década de 2001-2010. A partir dessas conexões, é possível identificar alguns clusteres. Interessante notar o fluxo de conjunto de dados geofísicos e dados de sedimento aparecendo (junto com vários outros tipos, como *video*, *sample*) como dados de entrada para técnicas de classificação. O termo *classification*, por sua vez, aparece significativamente ligado ao termo *habitat*. A importância dos termos *multibeam* e *backscatter* é evidenciada pelo tamanho dos símbolos quando comparado a outros tipos de dado. Vale ressaltar ainda a presença do termo *remote_sensing*, com uma conexão um pouco fraca ou indefinida, talvez devida às diversas limitações de aplicação, mas ainda assim marcando esse método em vários trabalhos.

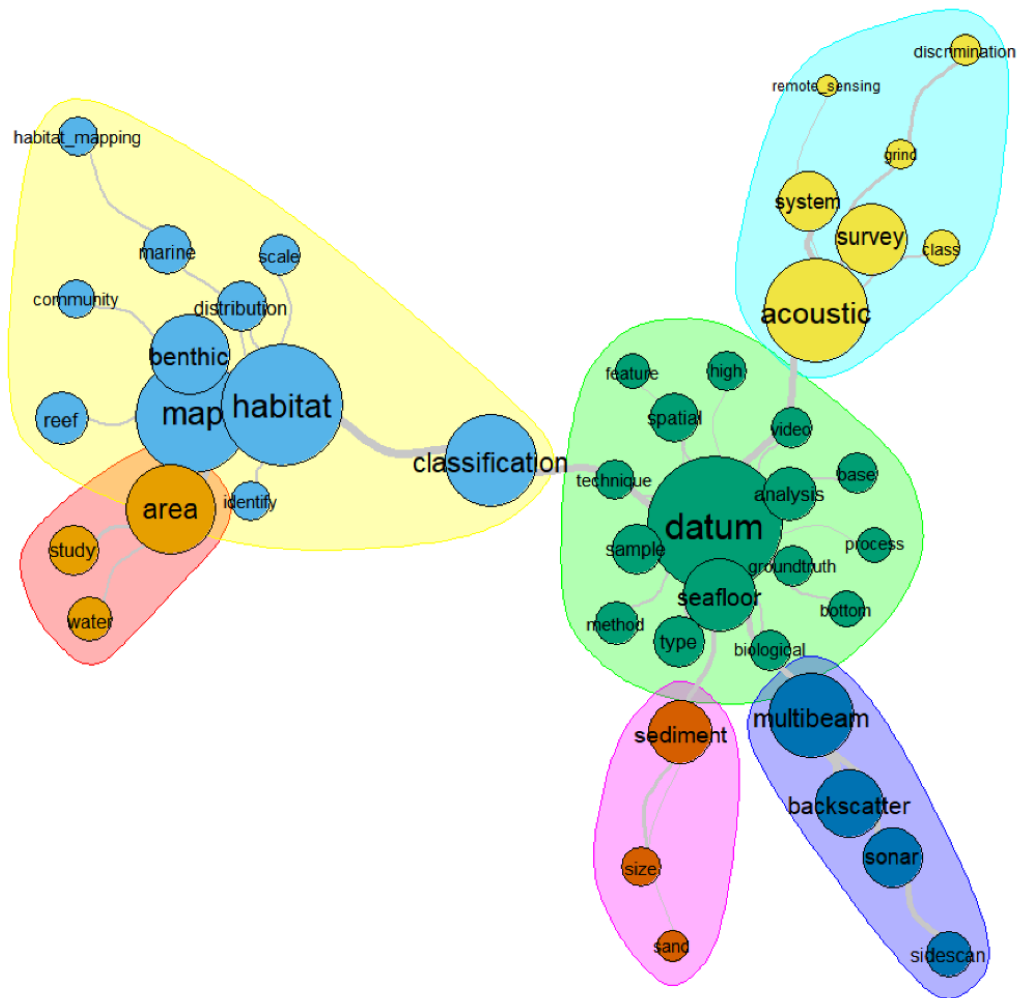


Figura 2-7: Gráfico de similitude com os termos mais frequentes no período entre 2001-2010. Note que as cores são usadas para representar a clusterização, e não o valor de similaridade. Quando maior a palavra e o símbolo circular associado, maior é a frequência de ocorrência de tal palavra. A espessura das conexões cinzas entre as palavras representa o quão frequente elas aparecem relacionadas uma à outra, isto é, a co-ocorrência dos termos.

Para a última década, o gráfico de similitude (Figura 2-8) mostrou algumas alterações. Baseado na clusterização, é possível observar a palavra *datum* protagonizando o cenário. Nessa configuração dos resultados, é possível inferir uma importância ainda maior do *backscatter* e do *multibeam*. Além disso, interessante ressaltar que uma das ramificações clusteriza termos como *model*, *accuracy* e *percent*, o que indica o aperfeiçoamento das classificações.

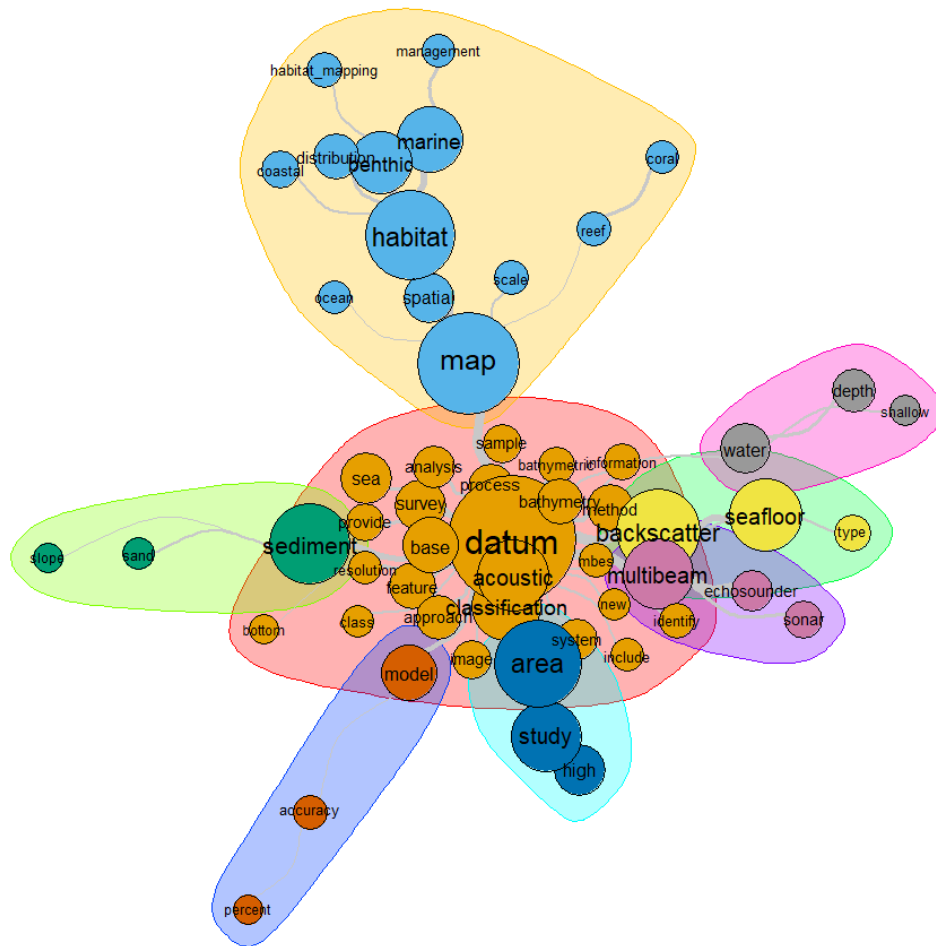


Figura 2-8: Gráfico de similitude com os termos mais frequentes no período entre 2011-2019. Note que as cores são usadas para representar a clusterização, e não o valor de similaridade. Quando maior a palavra e o símbolo circular associado, maior é a frequência de ocorrência de tal palavra. A espessura das conexões cinzas entre as palavras representa o quão frequente elas aparecem relacionadas uma à outra, isto é, a co-ocorrência dos termos.

A composição de nuvens de palavras da Figura 2-9 mostra o panorama para cada ano entre 2011 e 2019. Buscando otimizar a apresentação visual, os gráficos foram configurados para mostrar menos palavras.

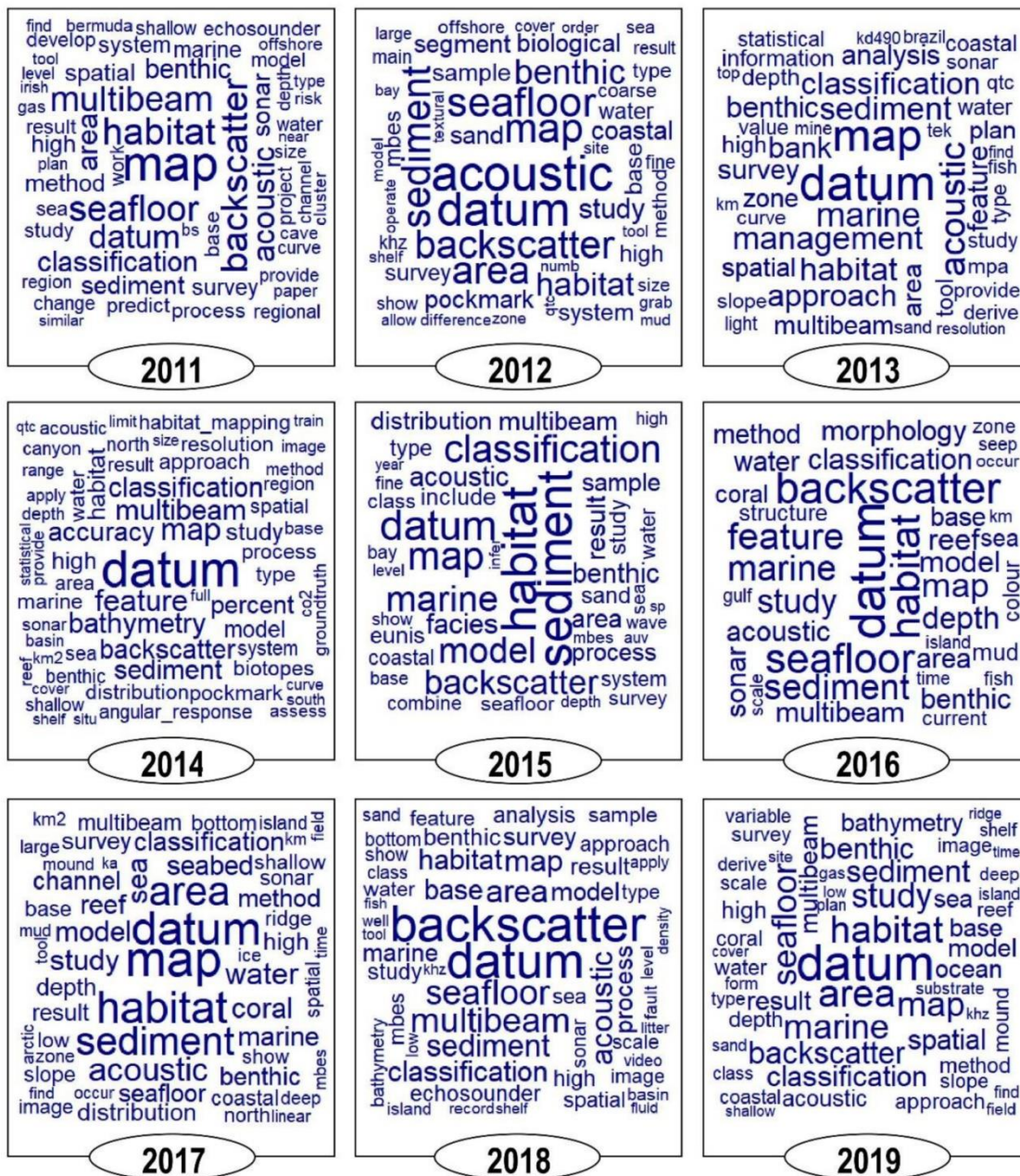


Figura 2-9: Composição de nuvens de palavras para cada ano na última década.

Como esperado, o termo *datum* foi sempre o mais recorrente. Baseado nesses gráficos, é possível notar a assídua recorrência da palavra *classification* (exceção em 2012). De fato, o desenvolvimento de esquemas de classificação está associado a disponibilidade de dados e a outros termos também bem-marcados, como *model*, que pode ser relacionado ao desenvolvimento de ferramentas (várias publicações na edição especial da Geosciences em 2017 dedicada a geomorfometria) de segmentação e classificação, tais como BTM, BRESS e RSobria, entre várias outras técnicas supervisionadas e não supervisionadas. Para os últimos anos, observou-se uma recorrência do termo *accuracy* (2016, 2017, 2018 e 2019), *repeatable* (2017, 2018, 2019), *multispectral* (2017, 2018, 2019) e *machine_learning* (2018 e 2019). Novamente *backscatter* e *multibeam*, bem como seus acrônimos *bs* e *mb*, são termos notórios e se consolidam como os dados e variáveis mais usadas para mapeamento e classificação do fundo

marinho. Outra indicação do potencial e da importância desses dados é a edição especial da *Marine Geophysical Research* (2018) dedicada inteiramente a trabalhos baseados em dados de *backscatter*.

Considerando que a abordagem aqui proposta lida diretamente com publicação científica como métrica para compreender e visualizar a evolução da ciência de mapeamento do fundo marinho, é fundamental destacar como iniciativas acadêmicas e profissionais tem influenciado tópicos nesse campo de pesquisa. As conferências GeoHab, por exemplo, estão associadas a algumas edições especiais de revistas científicas (exemplo: *Continental Shelf Research*, 2014) e a documentos como o Lurton & Lamarche (2015) – instruções, práticas e recomendações relacionadas ao *backscatter*. Importante também ressaltar as sessões especiais em Mapeamento do fundo das conferências da AGU e EGU (American e European Geosciences Union), e o trabalho do grupo de geomorfologia submarina da IAG (International Association of Geomorphologists) – Micallef et al (2018).

Nas últimas duas décadas, as palavras *habitat*, *acoustic*, *map* tornaram-se mais frequentes (junto com *Datum*). Considerando que não foram incluídos nas análises os resumos de congresso, deve-se ressaltar o papel e a influência dessas conferências na comunidade científica fomentando trabalhos na área de mapeamento. Enquanto programas nacionais de mapeamento do fundo marinho também direcionam parte da produção científica, esses eventos científicos constituem um dos principais fórum para discussão especializada, colaborações e progresso científico. Assim, é crucial enfatizar a importância global desses eventos e conferências para a comunidade científica se unir e realizar discussões integradas com setores da indústria, governos, além de estimular novos cientistas e promover, divulgar e facilitar diversas aplicações.

3.3. Importância, aplicabilidade e direções futuras do mapeamento do fundo marinho

A apresentação dos resultados conseguiu ilustrar um panorama geral da evolução da ciência de mapeamento do fundo marinho, destacando desde abordagens mais exploratórias do oceano de trabalhos mais antigos, até técnicas mais especializadas e modernas, como a classificação não supervisionada utilizando *machine learning*. Além disso, fica claro a abrangência e importância do mapeamento do fundo marinho para diversas vertentes, dentre as quais podemos citar hidrografia, exploração de recursos minerais (Wadhawan et al, 2016; Hong et al, 2019), planejamento e conservação de áreas de preservação ambiental – recorrência do termo *marine_protected_area* (Deiana et al, 2019; Innangi et al, 2019), suporte para questões associadas a zona exclusiva econômica (Lockwood et al, 1988; Marques et al, 2019), poluição marinha (Karl et al, 1994; Buhl-Mortensen et al, 2017; Goodman et al, 2019), pesquisa e desenvolvimento de tecnologia (Renard et al, 1979; Griffiths et al, 1997; Gaida et al, 2018; Masetti et al, 2018; Foglini et al, 2019), estudos oceanográficos e multidisciplinares (Gutperlet et al, 2017; Turner et al, 2018; Jovane et al, 2019), estudo e gerenciamento de recursos pesqueiros (Harper et al, 2010; Mosca et al, 2016), estudos e acompanhamento de impactos ambientais e mudanças climáticas (Nelson et al, 2019), e várias outras aplicações.

Em ambas as edições de Harris and Baker (2012 e 2019), que compõem um importante compilado de trabalhos e estudos de caso de mapeamento de habitats, também se enfatiza as múltiplas aplicações e propósitos do mapeamento do fundo marinho (principalmente para planejamento espacial marinho e área de preservação ambiental). Adicionalmente, os autores reportaram que as variáveis mais coletadas e úteis para o desenvolvimento dos trabalhos foram a profundidade e o *backscatter*, coerente como panorama geral das nuvens de palavras já

apresentadas. Geograficamente, é interessante notar que na versão de 2019: i) concentração de trabalhos de mapeamento de habitats na América do Norte e Europa, em consonância com o que foi verificado no mapa da UNESCO já mencionado anteriormente; ii) ausência de trabalhos na Ásia, o que também foi observado nas buscas de referências das bases de dados consultadas; iii) 7 dos 9 trabalhos na América do Sul foram no Brasil.

Ao reunir algumas direções futuras observadas ao longo de alguns trabalhos de revisão bibliográfica, algumas concordâncias tornam-se perceptíveis. Desde 2006, existem menções associadas a alcançar informações do fundo marinho para a produção de mapas temáticos, monitoramento da coluna d'água, melhoria de veículos autônomos submarinos, resolução e visualização dos dados (Mayer, 2006). Já na revisão de classificação acústica do fundo marinho (Anderson et al 2008), direções futuras como a relação entre interpretação e estatística, resolução e o uso de múltiplas frequências para melhorar a classificação acústica. Resolução é um tema recorrente desde 1954 (Luskin et al, 1954), quando foi reportado que a acurácia de determinadas medições foram mais altas do que 1 em 3000 braçadas, enquanto hoje resolução centimétrica é alcançada com métodos de sonar de abertura sintética (Ødegård et al, 2018). Resolução e acurácia apareceram desde a década 1990, o que é coerente com os avanços tecnológicos.

Direções futuras vislumbradas a partir das análises apresentadas com influência da subjetividade interpretativa do autor incluem abordagens e investigações cada vez mais integradas e relacionadas ao grande e crescente volume de dados disponíveis (exemplo: modelos sofisticados envolvendo abordagens não supervisionadas). Além disso, temos como *multispectral* e *water column* irão se tornar mais acessíveis e contribuir de sobremaneira para a classificação do fundo marinho. Conforme o progresso do mapeamento do fundo, termos como *resolution* e *accuracy* permanecerão constantes, assim como o desafio de criar uma representação adequada que contemple múltiplas camadas e resoluções, envolvendo realidade virtual. Em paralelo, certamente o desenvolvimento tecnológico de baterias mais capazes, assim como a melhoria de técnicas para transferência e armazenamento de dados irão contribuir com questões associadas a veículos autônomos e repositórios de dados. Além disso, o uso de sistemas não acústicos para mapeamento de águas rasas (como *Lidar* em drones) deve ser mais difundido nessa nova década.

A década mais recentemente iniciada traz a promessa de alcançar um grande desafio de reconhecer e representar o mapa do fundo global com uma resolução “suficiente” ou adequada. Todas as análises e as afirmações previamente mencionadas nesse capítulo convergem para a importância e necessidade do mapeamento do fundo marinho, mas é preciso cautela para não distorcer ou desqualificar a história do mapeamento considerando as técnicas disponíveis e as respectivas limitações, principalmente em termos de resolução. Restrições intrínsecas às metodologias de gravimetria e métodos eletromagnéticos, por exemplo, colocam em evidência a questão de como suprir desafios tais como alto custo operacional, representação espacial e resolução. Em Mayer et al (2018) e Jakobsson et al (2017), são apresentadas perspectivas acerca do mapeamento oceânico e várias metas para alcançar um mapeamento global. Considerando tais premissas, por exemplo, calculou-se um período de 967 anos como sendo o necessário para mapear todo o fundo marinho desconhecido em um hipotético levantamento com apenas um barco. A declaração das Nações Unidas para a Década da Ciência Oceânica e Desenvolvimento Sustentável (2021-2030) estabelece um atlas digital do oceano como sendo uma das áreas prioritárias de pesquisa e desenvolvimento (Ryabinin et al, 2019). Vale a pena pontuar a existência do projeto Seabed 2030, que, em sinergia e parceria com a Década da Ciência Oceânica, propõe fundamentalmente a melhoria do mapeamento do fundo

oceânico global atrelada a disponibilidade dos dados. A expectativa futura de um mapa do fundo marinho mais bem detalhado é produzir modelos climáticos e de circulação, fornecer informações de base para predição e distribuição de habitat, revelar novas feições e paisagens submarinas, contribuir com planejamento e gerenciamento (todas de certa forma associadas com metas de desenvolvimento sustentável). Espera-se que todas essas contribuições e expectativas sejam registradas na forma de produção científica, e que impactem grandemente no conhecimento dos oceanos e das geociências, assim como o mapa de Bruce Heezen e Marie Tharp.

4. CONCLUSÕES

Em geral, o uso da análise léxica como ferramenta para minerar um grande conjunto de artigos permitiu analisar com sucesso o estado da arte do mapeamento do fundo marinho ao longo de quase um século. Trabalhos mais antigos introduziram a temática com investigações mais exploratórias de acordo com os termos recorrentes (*ocean, interpretation, investigation*), com uma alteração desse panorama influenciada fortemente pelo avanço tecnológico (*echo, sidescan, multibeam*), em direção a incorporação de abordagens mais integradas e complexas, com termos como *habitat mapping, classification e backscatter*. O crescimento da produção científica relacionada ao mapeamento do fundo marinho também foi claramente observado ao longo das décadas, seguindo a tendência de investimentos em pesquisa e tecnologia de acordo com demandas nacionais e internacionais para definição de zona econômica exclusiva, recursos marinhos, exploração de óleo e gás, conservação, energia renovável, planejamento espacial marinho e desafios científicos relacionados a mudanças climáticas.

A importância e potencial das variadas aplicações do mapeamento do fundo marinho também ficou bem evidente. A perspectiva para a nova década é que a produção científica no campo de mapeamento siga as últimas demandas e tendências, como avanços tecnológicos e veículos autônomos para hidrografia, aplicações cada vez mais avançadas em modelos estatísticos e inteligência artificial para classificação e predição automática do fundo, maiores resoluções (tanto em águas rasas como em profundas), e, como uma das grandes metas, um repositório de dados para tornar acessível informações para melhorar o entendimento dos oceanos.

O conhecido mapa de Maria Tharp e Bruce Heezen no final dos anos 1960 influenciou várias gerações de geocientistas marinhos, e as expectativas que a nova década carrega é a de produzir uma nova visão em termos de geomorfologia que impacte de maneira similar gerações futuras. Por fim, é interessante uma última notação de que uma das importantes tendências detectada no conjunto de trabalhos mais novos foi a do uso de metodologias quantitativas e replicáveis. Tal tendência é coerente com o que foi proposto nesse capítulo de revisão, no qual cálculos estatísticos foram implementados para avaliar quantitativamente uma variável essencialmente qualitativa – as palavras.

REFERÊNCIAS

- Anderson, J. T.; Van Holliday, D.; Kloser, R.; Reid, D. G.; Simard, Y. Acoustic Seabed Classification: Current Practice and Future Directions. *ICES Journal of Marine Science* 2008, 65 (6), 1004–1011. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsn061>.
- Atkinson, K. M.; Koenka, A. C.; Sanchez, C. E.; Moshontz, H.; Cooper, H. Reporting Standards for Literature Searches and Report Inclusion Criteria: Making Research Syntheses More Transparent and Easy to Replicate: Reporting Standards for Literature Searches. *Res. Syn. Meth.* 2015, 6 (1), 87–95. <https://doi.org/10.1002/jrsm.1127>.
- Brown, C. J.; Smith, S. J.; Lawton, P.; Anderson, J. T. Benthic Habitat Mapping: A Review of Progress towards Improved Understanding of the Spatial Ecology of the Seafloor Using Acoustic Techniques. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 2011, 92 (3), 502–520. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.02.007>.
- Buhl-Mortensen, L.; Buhl-Mortensen, P.; Dolan, M. F. J.; Holte, B. The MAREANO Programme – A Full Coverage Mapping of the Norwegian off-Shore Benthic Environment and Fauna. *Marine Biology Research* 2015, 11 (1), 4–17. <https://doi.org/10.1080/17451000.2014.952312>.
- Damuth, J. E. Echo Character of the Western Equatorial Atlantic Floor and Its Relationship to the Dispersal and Distribution of Terrigenous Sediments. *Marine Geology* 1975, 18 (2), 17–45. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(75\)90047-X](https://doi.org/10.1016/0025-3227(75)90047-X).
- de Moustier, C. Beyond Bathymetry: Mapping Acoustic Backscattering from the Deep Seafloor with Sea Beam. *The Journal of the Acoustical Society of America* 1986, 79 (2), 316–331. <https://doi.org/10.1121/1.393570>.
- de Moustier, C. State of the Art in Swath Bathymetry Survey Systems. *International Hydrographic Review* 1988, 65, 25–54.
- Deacon, M. *Scientists and the Sea, 1650-1900: A Study of Marine Science*, 2nd ed.; Ashgate: Aldershot, Hampshire, Great Britain; Brookfield, Vt, 1997.
- Dhar, V. Data Science and Prediction. *Commun. ACM* 2013, 56 (12), 64–73. <https://doi.org/10.1145/2500499>.
- Duarte, C. M.; Agusti, S.; Barbier, E.; Britten, G. L.; Castilla, J. C.; Gattuso, J.-P.; Fulweiler, R. W.; Hughes, T. P.; Knowlton, N.; Lovelock, C. E.; Lotze, H. K.; Predragovic, M.; Poloczanska, E.; Roberts, C.; Worm, B. Rebuilding Marine Life. *Nature* 2020, 580 (7801), 39–51. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2146-7>.
- Ewing, M.; Vine, A. Deep-Sea Measurements without Wires or Cables. *Trans. AGU* 1938, 19 (1), 248. <https://doi.org/10.1029/TR019i001p00248>.
- Farr, H. K. Multibeam Bathymetric Sonar: Sea Beam and Hydro Chart. *Marine Geodesy* 1980, 4 (2), 77–93. <https://doi.org/10.1080/15210608009379375>.
- Feldens, P.; Schulze, I.; Papenmeier, S.; Schönke, M.; Schneider von Deimling, J. Improved Interpretation of Marine Sedimentary Environments Using Multi-Frequency Multibeam Backscatter Data. *Geosciences* 2018, 8 (6), 214. <https://doi.org/10.3390/geosciences8060214>.
- Foglini, F.; Grande, V.; Marchese, F.; Bracchi, V. A.; Prampolini, M.; Angeletti, L.; Castellan, G.; Chimienti, G.; Hansen, I. M.; Gudmundsen, M.; Meroni, A. N.; Mercorella, A.; Vertino, A.; Badalamenti, F.; Corselli, C.; Erdal, I.; Martorelli, E.; Savini, A.; Taviani, M. Application of Hyperspectral Imaging to Underwater Habitat Mapping, Southern Adriatic Sea. *Sensors* 2019, 19 (10), 2261. <https://doi.org/10.3390/s19102261>.
- Fruchterman, T. M. J.; Reingold, E. M. Graph Drawing by Force-Directed Placement. *Softw: Pract. Exper.* 1991, 21 (11), 1129–1164. <https://doi.org/10.1002/spe.4380211102>.
- Gaida, T.; Tengku Ali, T.; Snellen, M.; Amiri-Simkooei, A.; van Dijk, T.; Simons, D. A Multispectral Bayesian Classification Method for Increased Acoustic Discrimination of Seabed Sediments Using Multi-Frequency Multibeam Backscatter Data. *Geosciences* 2018, 8 (12), 455. <https://doi.org/10.3390/geosciences8120455>.
- Glenn, M. F. Introducing an Operational Multi-Beam Array Sonar. *International Hydrographic Review* 1970, 47 (1).
- Goodman, A. J.; Walker, T. R.; Brown, C. J.; Wilson, B. R.; Gazzola, V.; Sameoto, J. A. Benthic Marine Debris in the Bay of Fundy, Eastern Canada: Spatial Distribution and Categorization Using Seafloor Video Footage. *Marine Pollution Bulletin* 2019, 150, 110722. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110722>.
- Griffiths, H. D.; Rafik, T. A.; Meng, Z.; Cowan, C. F. N.; Shafeeu, H.; Anthony, D. K. Interferometric Synthetic Aperture Sonar for High-Resolution 3-D Mapping of the Seabed. *IEE Proc., Radar Sonar Navig.* 1997, 144 (2), 96. <https://doi.org/10.1049/ip-rsn:19971076>.

- Harris, P. T.; Baker, E. K. GeoHab Atlas of Seafloor Geomorphic Features and Benthic Habitats. In *Seafloor Geomorphology as Benthic Habitat*; Elsevier, 2012; pp 871–890. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385140-6.00064-5>.
- Harris, P. T.; Baker, E. K. *Seafloor Geomorphology as Benthic Habitat: GeoHAB Atlas of Seafloor Geomorphic Features and Benthic Habitats*; 2020.
- Heezen, B.; Tharp, M. *World Ocean Floor*. 1977.
- Innangi, S.; Tonielli, R.; Romagnoli, C.; Budillon, F.; Di Martino, G.; Innangi, M.; Laterza, R.; Le Bas, T.; Lo Iacono, C. Seabed Mapping in the Pelagic Islands Marine Protected Area (Sicily Channel, Southern Mediterranean) Using Remote Sensing Object Based Image Analysis (RSOBIA). *Mar Geophys Res* 2019, 40 (3), 333–355. <https://doi.org/10.1007/s11001-018-9371-6>.
- Jakobsson, M.; Allen, G.; Carbotte, S. M.; Falconer, R.; Ferrini, V.; Marks, K. *The Nippon Foundation - GEBCO - Seabed 2030: Roadmap for Future Ocean Floor Mapping*. 2017.
- Jovane, L.; Hein, J. R.; Yeo, I. A.; Benites, M.; Bergo, N. M.; Corrêa, P. V. F.; Couto, D. M.; Guimarães, A. D.; Howarth, S. A.; Miguel, H. R.; Mizell, K. L.; Moura, D. S.; Vicentini Neto, F. L.; Pompeu, M.; Rodrigues, I. M. M.; Santana, F. R.; Serrão, P. F.; Silva, T. E.; Tura, P. M.; Viscarra, C. L.; Chuqui, M. G.; Pellizari, V. H.; Signori, C. N.; Da Silveira, I. C. A.; Sumida, P. Y. G.; Murton, B. J.; Brandini, F. P. Multidisciplinary Scientific Cruise to the Rio Grande Rise. *Front. Mar. Sci.* 2019, 6, 252. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00252>.
- Karl, H. A.; Schwab, W. C.; Wright, A. St. C.; Drake, D. E.; Chin, J. L.; Danforth, W. W.; Ueber, E. Acoustic Mapping as an Environmental Management Tool: I. Detection of Barrels of Low-Level Radioactive Waste, Gulf of the Farallones National Marine Sanctuary, California. *Ocean & Coastal Management* 1994, 22 (3), 201–227. [https://doi.org/10.1016/0964-5691\(94\)90032-9](https://doi.org/10.1016/0964-5691(94)90032-9).
- Kaskela, A.; Kotilainen, A.; Alanen, U.; Cooper, R.; Green, S.; Guinan, J.; van Heteren, S.; Kihlman, S.; Van Lancker, V.; Stevenson, A.; the EMODnet Geology Partners. Picking Up the Pieces—Harmonising and Collating Seabed Substrate Data for European Maritime Areas. *Geosciences* 2019, 9 (2), 84. <https://doi.org/10.3390/geosciences9020084>.
- Kenny, A. J.; Cato, I.; Desprez, M.; Fader, G.; Schüttenhelm, R. T. E.; Side, J. An Overview of Seabed-Mapping Technologies in the Context of Marine Habitat Classification☆. *ICES Journal of Marine Science* 2003, 60 (2), 411–418. [https://doi.org/10.1016/S1054-3139\(03\)00006-7](https://doi.org/10.1016/S1054-3139(03)00006-7).
- Lecours, V.; Dolan, M. F. J.; Micallef, A.; Lucieer, V. L. A Review of Marine Geomorphometry, the Quantitative Study of the Seafloor. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2016, 20 (8), 3207–3244. <https://doi.org/10.5194/hess-20-3207-2016>.
- Lockwood, M.; Hill, G. W. Developing a 10-Year EEZ Seafloor Mapping and Research Program. *Marine Geodesy* 1988, 12 (3), 167–175. <https://doi.org/10.1080/15210608809379586>.
- Lucieer, V.; Barrett, N.; Butler, C.; Flukes, E.; Ierodiaconou, D.; Ingleton, T.; Jordan, A.; Monk, J.; Meeuwig, J.; Porter-Smith, R.; Smit, N.; Walsh, P.; Wright, A.; Johnson, C. A Seafloor Habitat Map for the Australian Continental Shelf. *Sci Data* 2019, 6 (1), 120. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0126-2>.
- Lurton, X.; Lamarche, G. *Backscatter Measurements by Seafloor-mapping Sonars. Guidelines and Recommendations*. 2015.
- Luskin, B.; Heezen, B. C.; Ewing, M.; Landisman, M. Precision Measurement of Ocean Depth. *Deep Sea Research* (1953) 1954, 1 (3), 131-IN8. [https://doi.org/10.1016/0146-6313\(54\)90044-1](https://doi.org/10.1016/0146-6313(54)90044-1).
- Marchand, P.; Ratinaud, P. L'analyse de Similitude Appliquée Aux Corpus Textuelles: Les Primaires Socialistes Pour l'élection Présidentielle Française. In *Actes des 11eme Journées internationales d'Analyse statistique des Données Textuelles*; Belgique, 2012; pp 687–699.
- Marques, S.; Araújo, T. C. M. de. Survey and Assessment of Seabed Resources from the Brazilian Continental Shelf by the Law of the Sea: From National to International Jurisdictions. *Ocean & Coastal Management* 2019, 178, 104858. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.104858>.
- Maury, M. F. *The Physical Geography of the Sea*; Sampson, Low, Son & Co. : London : 1855. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.102148>.
- Mayer, L. A. Frontiers in Seafloor Mapping and Visualization. *Mar Geophys Res* 2006, 27 (1), 7–17. <https://doi.org/10.1007/s11001-005-0267-x>.

- Mayer, L.; Jakobsson, M.; Allen, G.; Dorschel, B.; Falconer, R.; Ferrini, V.; Lamarche, G.; Snaith, H.; Weatherall, P. The Nippon Foundation—GEBCO Seabed 2030 Project: The Quest to See the World’s Oceans Completely Mapped by 2030. *Geosciences* 2018, 8 (2), 63. <https://doi.org/10.3390/geosciences8020063>.
- McKinney, C. M.; Anderson, C. D. Measurements of Backscattering of Sound from the Ocean Bottom. *The Journal of the Acoustical Society of America* 1964, 36 (1), 158–163. <https://doi.org/10.1121/1.1918927>.
- Misiuk, B.; Brown, C. J.; Robert, K.; Lacharité, M. Harmonizing Multi-Source Sonar Backscatter Datasets for Seabed Mapping Using Bulk Shift Approaches. *Remote Sensing* 2020, 12 (4), 601. <https://doi.org/10.3390/rs12040601>.
- Mosca, F.; Matte, G.; Lerda, O.; Naud, F.; Charlot, D.; Rioblanc, M.; Corbières, C. Scientific Potential of a New 3D Multibeam Echosounder in Fisheries and Ecosystem Research. *Fisheries Research* 2016, 178, 130–141. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2015.10.017>.
- Mulder, T.; Gillet, H.; Hanquiez, V.; Reijmer, J. J. G.; Droxler, A. W.; Recouvreur, A.; Fabregas, N.; Cavailles, T.; Fauquembergue, K.; Blank, D. G.; Guiastrrenec, L.; Seibert, C.; Bashah, S.; Bujan, S.; Ducassou, E.; Principaud, M.; Conesa, G.; Le Goff, J.; Ragusa, J.; Busson, J.; Borgomano, J. Into the Deep: A Coarse-Grained Carbonate Turbidite Valley and Canyon in Ultra-Deep Carbonate Setting. *Marine Geology* 2019, 407, 316–333. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2018.11.003>.
- Nafe, J. E.; Drake, C. L. Physical Properties of Marine Sediments. Tech. Rep., TR-2 1961, 3, 45.
- Nelson, K.; Burnside, N. G. Identification of Marine Management Priority Areas Using a GIS-Based Multi-Criteria Approach. *Ocean & Coastal Management* 2019, 172, 82–92. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.02.002>.
- Novacek, E.; Devillers, R.; Edinger, E. Generating Higher Resolution Regional Seafloor Maps from Crowd-Sourced Bathymetry. *PLoS ONE* 2019, 14 (6), e0216792. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0216792>.
- Ødegård, Ø.; Hansen, R. E.; Singh, H.; Maarleveld, T. J. Archaeological Use of Synthetic Aperture Sonar on Deepwater Wreck Sites in Skagerrak. *Journal of Archaeological Science* 2018, 89, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2017.10.005>.
- Otto, J. M. National Geological Surveys Policies and Practice. *Resources Policy* 1995, 21 (1), 27–35. [https://doi.org/10.1016/0301-4207\(95\)92249-Q](https://doi.org/10.1016/0301-4207(95)92249-Q).
- Paisley, J. T. K. Survey of a Seapeak in the Mozambique Channel. *Deep Sea Research* 1956, 3, 145–149.
- Persand, S. A Practical Overview of Article 76 of the United Nations Convention on the Law of the Sea. 2005, 37.
- Picard, K.; Brooke, B. P.; Harris, P. T.; Siwabessy, P. J. W.; Coffin, M. F.; Tran, M.; Spinoccia, M.; Weales, J.; Macmillan-Lawler, M.; Sullivan, J. Malaysia Airlines Flight MH370 Search Data Reveal Geomorphology and Seafloor Processes in the Remote Southeast Indian Ocean. *Marine Geology* 2018, 395, 301–319. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2017.10.014>.
- Ratinaud, P. IRAMUTEQ: Interface de R Pour Les Analyses Multidimensionnelles de Textes et de Questionnaires.; 2009.
- Renard, V.; Allenou, J.-P. SEA BEAM, Multi-Beam Echo-Sounding in “Jean Charcot”: Description, Evaluation and First Results. *International Hydrographic Review* 1979, LV1 1, 35–67.
- Report on the Scientific Results of the Voyage of H.M.S. “Challenger” during the Years 1873–76 under the Command of Capt. George S. Nares, R.N., F.R.S., and Capt. F. T. Thomson, R.N. *Nature* 1884, 31 (791), 165–166. <https://doi.org/10.1038/031165a0>.
- Ryabinin, V.; Barbière, J.; Haugan, P.; Kullenberg, G.; Smith, N.; McLean, C.; Troisi, A.; Fischer, A.; Aricò, S.; Aarup, T.; Pissierssens, P.; Visbeck, M.; Enevoldsen, H. O.; Rigaud, J. The UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development. *Front. Mar. Sci.* 2019, 6, 470. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00470>.
- Sacchetti, F.; Benetti, S.; Fitzpatrick, F. The Irish Seabed Mapping Programme: INFOMAR - Integrated Mapping Survey for the Sustainable Developments of Ireland’s Marine Resources. In *AGU Fall Meeting Abstracts*; 2006.
- Seibold, E.; Berger, W. *The Sea Floor*; Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment; Springer International Publishing: Cham, 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51412-3>.
- Shepard, F. P. *Submarine Geology*, 3rd Edition; Harper & Row Publishers: New York, 1973.
- Sheriff, R. E.; Geldart, L. P. *Exploration Seismology*, 2nd ed.; Cambridge University Press, 1995. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139168359>.

- Smith, W. H. F.; Sandwell, D. T. Global Sea Floor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Soundings. *Science* 1997, 277 (5334), 1956–1962. <https://doi.org/10.1126/science.277.5334.1956>.
- Snellen, M.; Gaida, T. C.; Koop, L.; Alevizos, E.; Simons, D. G. Performance of Multibeam Echosounder Backscatter-Based Classification for Monitoring Sediment Distributions Using Multitemporal Large-Scale Ocean Data Sets. *IEEE J. Oceanic Eng.* 2019, 44 (1), 142–155. <https://doi.org/10.1109/JOE.2018.2791878>.
- Stewart, H. A.; Jamieson, A. J. The Five Deeps: The Location and Depth of the Deepest Place in Each of the World's Oceans. *Earth-Science Reviews* 2019, 197, 102896. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102896>.
- Submarine Geomorphology; Micallef, A., Krastel, S., Savini, A., Eds.; Springer Geology; Springer International Publishing: Cham, 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-57852-1>.
- Todd, B. J.; Greene, H. G. *Mapping the Seafloor for Habitat Characterization*, 2007.
- Unesco. *The Science We Need for the Ocean We Want: The United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development (2021-2030)*. 2019.
- Verlaan, P. A. New Seafloor Mapping Technology and Article 76 of the 1982 United Nations Convention on the Law of the Sea. *Marine Policy* 1997, 21 (5), 425–434. [https://doi.org/10.1016/S0308-597X\(97\)00008-0](https://doi.org/10.1016/S0308-597X(97)00008-0).
- Wadhawan, S. K. Marine Geology and Coastal Surveys for Seabed Mapping and Mineral Resource Evaluation in India – An Overview. *Proc Indian Natn Sci Acad* 2016, 82 (3). <https://doi.org/10.16943/ptinsa/2016/48476>.
- Weatherall, P.; Marks, K. M.; Jakobsson, M.; Schmitt, T.; Tani, S.; Arndt, J. E.; Rovere, M.; Chayes, D.; Ferrini, V.; Wigley, R. A New Digital Bathymetric Model of the World's Oceans: NEW DIGITAL BATHYMETRIC MODEL. *Earth and Space Science* 2015, 2 (8), 331–345. <https://doi.org/10.1002/2015EA000107>.
- Wöfl, A.-C.; Snaith, H.; Amirebrahimi, S.; Devey, C. W.; Dorschel, B.; Ferrini, V.; Huvenne, V. A. I.; Jakobsson, M.; Jencks, J.; Johnston, G.; Lamarche, G.; Mayer, L.; Millar, D.; Pedersen, T. H.; Picard, K.; Reitz, A.; Schmitt, T.; Visbeck, M.; Weatherall, P.; Wigley, R. Seafloor Mapping – The Challenge of a Truly Global Ocean Bathymetry. *Front. Mar. Sci.* 2019, 6, 283. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00283>.

CAPÍTULO 3

Abordagem multimetodológica aplicada à análise da resposta acústica multispectral do fundo marinho

O capítulo 3 resultou em publicação de artigo:

✓ Menandro PS, Bastos AC, Misiuk B., Brown CJ. 2022. Applying a multi-method framework to analyze the multispectral acoustic response of the seafloor. *Frontiers in Remote Sensing*, 3:860282. <https://doi.org/10.3389/frsen.2022.860282>



ORIGINAL RESEARCH
published: 30 March 2022
doi: 10.3389/frsen.2022.860282



Applying a Multi-Method Framework to Analyze the Multispectral Acoustic Response of the Seafloor

Pedro S. Menandro^{1*}, Alex C. Bastos¹, Benjamin Misiuk² and Craig J. Brown²

¹Marine Geosciences Lab, Departamento de Oceanografia e Ecologia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brazil, ²Seascape Ecology and Mapping Lab, Department of Oceanography, Dalhousie University, Halifax, NS, Canada

OPEN ACCESS

Edited by:

DeWayne Roger Bohnenstiehl,
North Carolina State University,
United States

Reviewed by:

Luis A. Conti,
University of São Paulo, Brazil
Bishwajit Chakraborty,
Council of Scientific and Industrial
Research (CSIR), India

*Correspondence:

Pedro S. Menandro
pedromenandro@gmail.com

Specialty section:

This article was submitted to
Acoustic Remote Sensing,
a section of the journal
Frontiers in Remote Sensing

Received: 22 January 2022

Accepted: 14 March 2022

Published: 30 March 2022

Improvements to acoustic seafloor mapping systems have motivated novel marine geological and benthic biological research. Multibeam echosounders (MBES) have become a mainstream tool for acoustic remote sensing of the seabed. Recently, "multispectral" MBES backscatter, which is acquired at multiple operating frequencies, has been developed to characterize the seabed in greater detail, yet methods for the use of these data are still being explored. Here, we evaluate the potential for seabed discrimination using multispectral backscatter data within a multi-method framework. We present a novel MBES dataset acquired using four operating frequencies (170, 280, 400, and 700 kHz) near the Doce River mouth, situated on the eastern Brazilian continental shelf. Image-based and angular range analysis methods were applied to characterize the multifrequency response of the seabed. The large amount of information resulting from these methods complicates a manual seabed segmentation solution. The data were therefore summarized using a combination of dimensionality reduction and density-based clustering, enabling hierarchical spatial classification of the seabed with sparse ground-truth. This approach provided an effective solution to synthesizing these data spatially to identify two distinct acoustic seabed classes, with four subclasses within one of the broader classes, which corresponded closely with seafloor sediment samples collected at the site. The multispectral backscatter data also provided information on likely, unknown, sub-surface substrate differences at this site. The study demonstrates that the adoption of a multi-method framework combining image-based and angular range analysis methods with multispectral MBES data can offer significant advantages for seafloor characterization and mapping.

Keywords: seabed classification, multispectral backscatter, density-based clustering, seafloor mapping, benthic habitat mapping, multibeam echosounder

1 INTRODUCTION

Abordagem multimetodológica aplicada à análise da resposta acústica multiespectral do fundo marinho

Resumo: Avanços e melhorias nos sistemas de mapeamento acústico do fundo marinho vêm facilitando e motivando o desenvolvimento de novas pesquisas relacionadas a questões geológicas e biológicas/bentônicas. Os sistemas de ecobatimetria multifeixe (MBES) tornaram-se a ferramenta protagonista para o sensoriamento remoto acústico do fundo do mar nas últimas décadas. Mais recentemente, o desenvolvimento do backscatter multiespectral do MBES, que é coletado e registrado em várias frequências de operação, apareceu como uma ferramenta de grande potencial para caracterizar o fundo marinho em maior nível de detalhe, e ainda hoje os métodos e aplicações desses dados ainda estão sendo explorados. Nesse capítulo, uma proposta baseada em uma abordagem multimetodológica é usada para avaliar o potencial de discriminação do fundo marinho utilizando um conjunto de dados de backscatter multiespectral coletado em quatro frequências operacionais (170, 280, 400 e 700 kHz) na Plataforma Continental adjacente a desembocadura rio Doce. Buscando compreender e caracterizar a resposta multifrequência do fundo marinho, foram combinados e aplicados métodos de análise baseado na imagem e baseados na variação angular. A grande quantidade de informações resultantes desses métodos surgiu como uma dificuldade que acabou motivando a implementação de técnicas para sintetização e redução dimensional do conjunto de dados, possibilitando por fim, a classificação espacial hierárquica do fundo marinho com utilização de amostragens diretas em quantidade limitada. Essa estrutura de análise produziu uma solução eficaz para sintetizar os dados espacialmente e reconhecer duas classes acústicas distintas do fundo marinho, sendo uma delas passível de subcategorização em outras quatro subclasses, que corresponderam de maneira satisfatória às amostras de sedimentos coletadas no local. Os dados de backscatter multiespectral forneceram ainda informações sobre possíveis (e desconhecidas) diferenças no substrato subsuperficial. O estudo demonstrou que a adoção de uma estrutura multimetodológica que combina abordagens baseada na imagem e na variação angular oferece vantagens relevantes para a caracterização e o mapeamento do fundo marinho.

1. INTRODUÇÃO

As inovações tecnológicas forneceram avanços em várias áreas das ciências marinhas nas últimas décadas, incluindo o campo de mapeamento do fundo marinho. Melhorias nos sistemas de mapeamento acústico, por exemplo, abriram diversas possibilidades para o desenvolvimento de novas pesquisas geológicas e biológicas/bentônicas. Nos últimos anos, o mapeamento do fundo marinho vem desenvolvendo ferramentas de classificação (Fonseca et al, 2009; Rzhannov et al, 2012; Lecours et al, 2016; Ierodionou et al, 2018; Masetti et al, 2018), o que facilita variadas abordagens com múltiplos propósitos, desde conservação e gestão ambiental (Cogan et al, 2009; Lee et al, 2015; Kirkman et al, 2019), cruzando diferentes campos científicos como estoques de carbono (Heap et al, 2014), pesca (Mosca et al, 2016) e paleoceanografia (Brooke et al, 2017).

Nas últimas duas décadas, os MBES tornaram-se a principal ferramenta para investigação acústica e remota do fundo marinho (Brown et al, 2011; capítulo 2), e são utilizados de maneira bem difundida para variados propósitos, tanto na pesquisa em Plataforma Continental (Innangi et al, 2015; Rocha et al, 2020) como em mar profundo (Sem et al, 2016; Picard et al, 2018; Stewart & Jamieson, 2019). Além de obterem as medidas batimétricas, tais sistemas

podem também registrar o backscatter a partir do mesmo sinal. O conceito de backscatter já foi introduzido no capítulo 1, consistindo basicamente na energia acústica que retorna após interação do sinal acústico com o fundo marinho (Lurton, 2010), resultando de processos mais complexos de absorção, reflexão e espalhamento do sinal na coluna d'água e na interface água/fundo marinho, além de envolver diversas propriedades físicas como a frequência e o ângulo de incidência. As medidas de backscatter são utilizadas de maneira consistente na discriminação e caracterização de habitats bentônicos (Costa, 2019; Harris and Baker, 2020; Trzcinska et al, 2020) e da geologia superficial (McGonigle and Collier, 2014; Montereale-Gavazzi et al, 2018). A análise de backscatter pode ser categorizada em duas escolas: 1) análise baseada na imagem (image-based analysis, termo em inglês utilizado de maneira bem difundida na literatura científica), na qual o dado de backscatter é compensado em relação a dependência angular e analisado como uma imagem – mosaico (Diesing et al, 2016; Ierodiaconou et al, 2018; Runya et al, 2021); e 2) análise da variação angular (Angular Range Analysis – ARA, termo em inglês utilizado de maneira bem difundida na literatura específica), que considera as diferenças na resposta angular (Fonseca & Mayer, 2007; Fonseca et al, 2009; Haris et al, 2011; Lurton et al, 2018). A compensação ou aplicação de filtros angulares (AVG – angular varying gain), que geralmente é aplicada para geração de mosaicos em abordagens baseada na imagem, geralmente resulta em perda da resolução angular, isto é, parte da informação da resposta acústica angular é perdida nesse processo para produção do mosaico. A ARA, por outro lado, preserva a informação angular detalhadamente com o custo da resolução e distribuição espacial. Fonseca et al (2009) pontuam que a análise da resposta angular e a análise dos mosaicos podem ser consideradas abordagens complementares, e essa combinação e complementaridade já foi aplicada e vem demonstrando resultados interessantes do ponto de vista de melhoria da acurácia da classificação do fundo marinho (Che Hasan et al, 2012; Che Hasan et al, 2014), otimizando dessa maneira a exploração do dado de backscatter.

Atualmente, a maioria dos MBES ainda operam em frequência única, apesar do conhecimento de que a resposta acústica do fundo marinho é dependente da frequência. A diferença entre a utilização do backscatter em uma única frequência e em multifrequência é comparável ao sensoriamento remoto óptico baseado em uma única frequência ou em múltiplas bandas espectrais (Diesing et al, 2016). O sensoriamento remoto terrestre é um campo de pesquisa com um histórico mais longo e mais desenvolvido, com modelos avançados e já implementados de classificação de imagem baseados em dados ópticos em uma gama de frequências simultâneas descrevendo e classificando detalhadamente a superfície terrestre (Lu and Weng, 2007). Já o sensoriamento remoto acústico multifrequência (ou multiespectral) do fundo marinho ainda não está desenvolvido de maneira tão robusta, ainda que algumas vantagens decorrentes da aplicação e análise de dados acústicos multiespectrais já venham sendo reconhecidas nos últimos anos (Huges Clarke, 2015; Tamsett et al, 2016; Feldens et al, 2018). A implementação recente do MBES multiespectral permitiu a aquisição simultânea em múltiplas frequências. Buscombe & Grams (2018), Gaida et al (2018), Brown et al (2019) e Costa (2019) investigaram e apresentaram os primeiros resultados de MBES multiespectral operando de tal maneira – todos eles com o mesmo conjunto de dados, coletados e disponibilizados em 2017 dentro de um contexto de lançamento dessa nova capacidade de coleta de dados multiespectrais para a comunidade científica (“*Multispectral Challenge*”, da empresa fabricante R2 Sonic). Todos os estudos reportaram um ganho em termos de discriminação do fundo marinho como consequência do conjunto de dados em várias frequências, que forneceu mais informações acústicas de diferentes tipos de fundo e permitiu uma descrição e caracterização mais detalhada.

Ainda que as vantagens do método multiespectral pareçam consistentes e com grande potencial para melhorar a diferenciação dos tipos de substrato, a aplicação e análise dos dados ainda está em desenvolvimento em vários outros contextos. Um exemplo é a ampla utilização de dados de backscatter monofrequência (tanto de MBES quanto de sonar de varredura lateral) para levantamentos de cunho exploratório que visam estabelecer um conhecimento de base do fundo marinho (Augustin et al, 1996. Greene et al, 2013; Lucieer et al, 2018). A possibilidade da coleta multifrequência não deve subvalorizar ou descredenciar o que já existe, além de que é necessário balancear as vantagens; um fator importante nesse sentido é o volume de informações que é registrado pelo método multiespectral. Adicionalmente, várias técnicas de análise e classificação do fundo marinho calculam e utilizam efetivamente propriedades derivadas do backscatter ou da batimetria (por exemplo, variância, similaridade, inclinação, rugosidade, entre várias outras), com abordagens tanto baseadas na imagem/mosaico como na dependência angular (Blondel and Sichi, 2009; Alevizos & Greinert, 2018; Fakiris et al, 2019). Portanto, a dimensão do dado multiespectral que é registrado e analisado acaba aumentando num fator multiplicador, dificultando o custo de armazenamento e computacional de análise, e acaba dessa forma exigindo uma solução adequada para extrair todo o benefício dessas informações multiespectrais para que sejam viáveis e vantajosas para qualquer tipo de aplicação. Assim, ainda não está bem estabelecido quais são as melhores abordagens de análise, quais informações devem ser priorizadas para propósitos exploratórios, principalmente quando se trata de um fundo marinho pouco conhecido.

Dentro desse contexto, esse capítulo avalia o potencial de discriminação do fundo marinho a partir de dados de backscatter multiespectral com base em uma estrutura multimetodológica de análise. Inicialmente o conjunto inédito de dados composto por quatro frequências (170, 280, 400 e 700 kHz) é apresentado, assim como as informações sedimentológicas obtidas pela coleta de amostras de sedimento. Adotando uma abordagem geoacústica, métodos baseados na imagem e na dependência angular são aplicados a fim de explorar o conjunto de dados e caracterizar a resposta multiespectral do fundo marinho. O enorme volume de informações resultante desses métodos é sumarizado utilizando redução dimensional e uma clusterização baseada na densidade (também referenciada adiante como density-based clustering), permitindo propor uma classificação espacial hierárquica do fundo marinho com poucas amostras/verdade de campo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Aquisição e processamento dos dados

A investigação é focada no mapeamento de uma área (37 km²) adjacente a desembocadura do rio Doce, situada na Plataforma Continental do Espírito Santo, no sudeste do Brasil. O rio Doce é um dos principais deltas reconhecidos ao longo da costa brasileira (Dominguez, 2006), e representa a principal fonte de sedimento terrígeno na região (Bastos et al, 2015). Em termos de processos sedimentares, Quaresma et al (2015) caracterizaram o lobo deltaico lamoso se estendendo até a faixa dos 30 metros de profundidade, além de identificarem acumulação preferencial de sedimentos finos (> 75% de lama) no depocentro ao sul da desembocadura; seguindo em direção offshore, facies arenosas são predominantes (Figura 3-1), o que foi corroborado posteriormente nas análises de Vieira et al (2019). Embora não seja o objetivo aqui apontar ou discutir eventuais limitações de trabalhos prévios, as pesquisas que já foram conduzidas nessa região (tanto literatura científica como em dados disponíveis em cartas náuticas) carecem de resolução espacial detalhada no que tange ao mapeamento acústico do fundo marinho, o que

acaba influenciando na lacuna de conhecimento acerca da geomorfologia e do tipo de fundo. Então, os dados analisados contribuem para suprir parcialmente o melhor conhecimento da região.

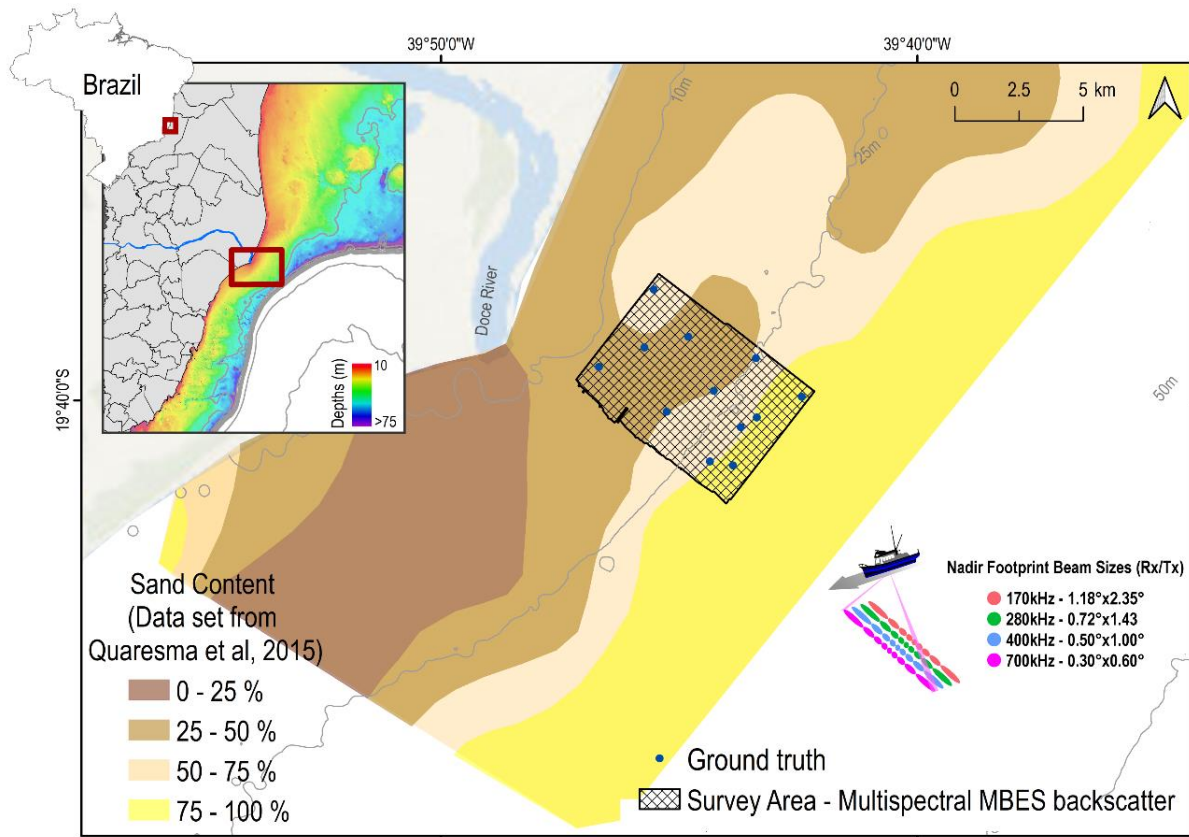


Figura 3- 1: Mapa da área de estudo (batimetria da Plataforma Continental adaptada de Bastos et al, 2015), com teor de areia estimado por Quaresma et al (2015). No canto inferior direito, um esquema ilustrativo da aquisição de MBES multiespectral indicando os pings sequenciais das diferentes frequências bem como o tamanho do *beam* na região central da varredura.

O conjunto de dados de batimetria e backscatter multifeixe multiespectral foram coletados no âmbito do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática (PMBA) entre 2019 e 2020. O equipamento utilizado foi o MBES da fabricante R2 Sonic, modelo 2024, com a cabeça do sonar acoplada a um sistema conhecido como moon pool, que consiste em uma abertura no centro da embarcação onde é instalada a haste com o sistema (multifeixe, sistema inercial para correção de movimentos – IMU, e perfilador da velocidade do som na superficial da água). A aquisição foi configurada para operar através de pings sequenciais em quatro frequências (170, 280, 400 e 700 kHz) no modo equiangular. A frequência de 700 kHz não foi habilitada durante todo o levantamento devido a limitações por causa de efeitos da profundidade e turbidez da água. Parâmetros como “Power”, “Pulse length”, “Gain” e “Spreading” foram mantidos inalterados ao longo de todo o levantamento após testes e definição de uma configuração que fosse ideal para toda a área de cobertura. A abertura dos feixes ou setor angular de emissão foi estabelecida como 90° ao longo dos quais 256 beams se distribuíram, com exceção da frequência de 700 kHz cuja abertura máxima é limitada a até 70°. Como o arranjo do receptor é plano, o tamanho da pegada ou “footprint” de cada beam recebido acaba sofrendo o efeito de um aumento elipsoidal de tamanho com a distância do nadir, ou seja, quando maior o ângulo de incidência no fundo marinho (beams dos ângulos mais externos), maior o tamanho do beam. O arranjo de emissão dos beams é arredondado, o que elimina a influência de tal efeito.

O sistema operou de maneira integrada com o POS MV Wave Master Inertial Navigation System (INS), com correção diferencial de posicionamento. Importante ressaltar que durante a aquisição dos dados foram adquiridos perfis verticais com Valeport Mini (configurado para coletar velocidade do som, pressão, salinidade e temperatura ao longo da coluna d'água) a cada 3 horas com o propósito de corrigir efeitos de refração dos feixes, bem como calcular e aplicar os valores de coeficiente de "Absorption" e permitir a correção do backscatter de acordo com a frequência. A aplicação dos coeficientes de "Absorption" para cada frequência foi a única correção radiométrica aplicada durante a aquisição dos dados, todas as outras são aplicadas no pós-processamento.

A aquisição foi realizada com o software QPS QINSy 8.18.3, com sobreposição planejada de 30% entre as linhas. A análise de qualidade dos dados batimétricos ocorreu durante a aquisição no software Caris HIPS 11.2, e o processamento foi realizado em laboratório no software Qimera 2.0. Para o processamento e análise dos registros de backscatter foram utilizados o software da QPS Fledermaus Geocorder Toolbox Version 7.9.5 (FMGT).

Seguindo as recomendações da IHO (Organização Internacional de Hidrografia, na sigla em inglês), o processamento dos registros batimétricos consistiu na limpeza manual de registros espúrios e correção da maré (dados extraídos de um ADCP fundeado na região). Após essas etapas, os dados foram filtrados para as respectivas frequências (170, 280, 400 e 700 kHz) – filtro de frequência "Reject all soundings that don't match the provided Frequency". Para cada frequência, o resultado consiste em uma superfície batimétrica - Digital Bathymetric Model (DBM), que pode ser tratada como arquivo de texto ou um raster, ambos com resolução de 2m. Já o backscatter, apesar de ainda não existir um padrão consolidado de processamento, seguiu as recomendações descritas em Lamarche and Lurton (2018) e em Schimel et al (2018). As principais etapas envolvem a filtragem de frequência, correção dos parâmetros de aquisição, a opcional correção AVG (Angular Varying Gain - filtro para compensação do efeito angular). Após essas etapas fundamentais do processamento, os dados podem ser exportados na forma de mosaico de backscatter (com resolução de 1 metro), ou podem ser analisados no FMGT utilizando ferramentas disponíveis baseadas na variação/dependência angular (Angular Range Analysis – ARA), e posteriormente exportados como arquivo de imagem ou texto.

2.2. Análise do backscatter multiespectral

Para exploração da resposta acústica e análise do backscatter, elementos de ambas as abordagens baseadas na imagem e dependência angular foram aplicados. O fluxo metodológico é sumarizado na Figura 3-2 e detalhado nos tópicos adiante.

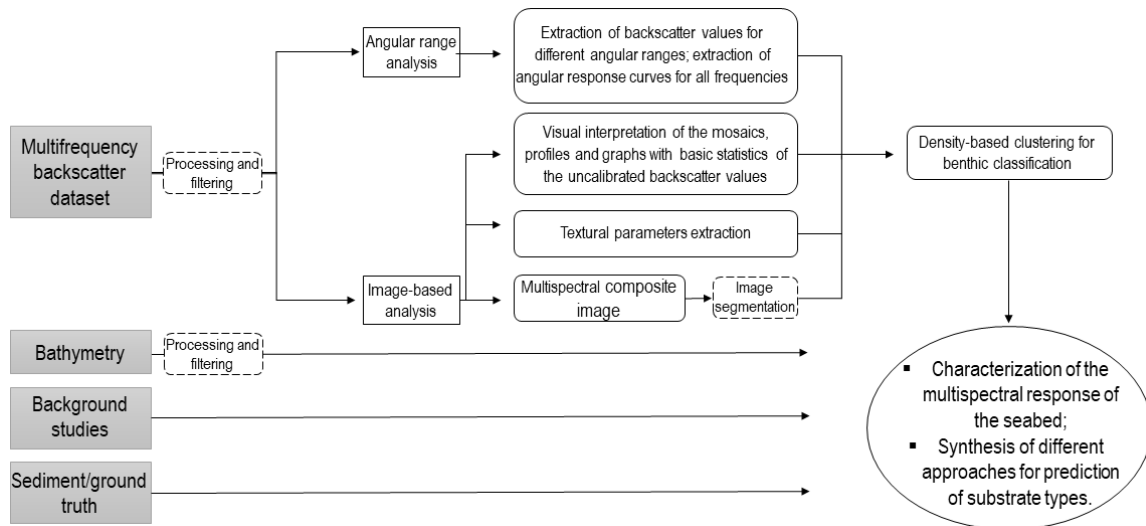


Figura 3-2: Fluxo metodológico das etapas seguidas durante a análise dos dados.

2.2.1. Análise baseada na imagem

A análise baseada na imagem que foi implementada aqui pode ser subdividida em três ramos principais. A primeira consiste na interpretação visual dos mosaicos e avaliação da estatística descritiva dos valores de backscatter para cada frequência, com gráficos, perfis e tabelas. Essa etapa é crucial para construção do conhecimento básico da área e do dado, e é frequentemente combinada com outras análises (Parnum & Gavrilov, 2011). Essa exploração dos dados foi realizada a partir de ferramentas do ArcGIS e R.

A segunda etapa consiste na extração de parâmetros texturais dos mosaicos, que é uma técnica já consolidada em diversas áreas, inclusive para classificação acústica de dados (Diesing et al, 2016; Diesing et al, 2020). A análise textural fundamentou-se em matrizes de co-ocorrência de tons de cinza (Grey-level co-occurrence matrices – GLCM) a partir do pacote GLCM v1.6.5 disponível no R (Haralick et al, 1973). Para cada mosaico, uma série de parâmetros texturais (aqui foi selecionada apenas a Variância) é calculada e extraída com base em quão frequentemente ocorrem combinações de pixel vizinhos diferentes (em uma janela 5 x 5).

A terceira parte que compõe parte da análise baseada na imagem consiste em uma abordagem ainda pouco difundida em trabalhos de mapeamento do fundo marinho em função do recente advento do multiespectral, mas que possui grande potencial na representação e combinação de diferentes atributos (tais como frequência), que é a imagem de banda composta (RGB – red 170 kHz, green 280 kHz, e blue 400 kHz).

2.2.2. Análise da variação angular (Angular Range Analysis – ARA)

A outra abordagem empregada nos dados de backscatter multiespectral foi a ARA. A dependência angular do backscatter, isto é, a mudança da resposta acústica de acordo com o ângulo de incidência da insonificação no fundo marinho, produz importantes informações aplicáveis na melhoria da classificação do fundo marinho (Che Hasan et al, 2014; McGonigle & Collier, 2014; Fezzani & Berger, 2018), e até mesmo para inferência de propriedades físicas como granulometria e impedância acústica do substrato (Fonseca & Mayer, 2007). Fonseca et al (2009) sugerem uma setorização angular para subdividir e interpretar as curvas de resposta angular,

compreendendo para cada bordo: região próxima ao nadir ($0^\circ - 25^\circ$), região afastada do nadir ($25^\circ - 55^\circ$), e região externa ($55^\circ - 85^\circ$).

Aqui, as curvas de resposta angular foram extraídas em cada estação amostral para fornecer informações descritivas adicionais, permitindo comparação entre as frequências e com modelos geofísicos. Além disso, os valores corrigidos do backscatter foram extraídos e exportados para os seguintes setores angulares: $1^\circ - 10^\circ$, $11^\circ - 20^\circ$, $21^\circ - 30^\circ$, e $31^\circ - 40^\circ$ utilizando um script customizado no R. Os resultados desses 4 setores angulares para cada frequência foram rasterizados e integrados com as outras camadas de dados (mosaicos, GLCM) no ArcGIS.

2.3. Density-based clustering

A enorme quantidade de informação das diferentes abordagens descritas anteriormente para o backscatter multiespectral foi espacialmente sumarizada utilizando a técnica de clusterização *density-based*. Diferentemente de vários métodos de clusterização que se baseiam em medidas de distâncias multivariadas para identificar clusters, essa técnica identifica os clusters usando estimativas de densidade de dados multivariados (Hahsler et al, 2019; Hahsler & Piekenbrock, 2021). Comparada a outras abordagens de clusterização, *density-based clustering* oferece uma série de vantagens como por exemplo a identificação automática do número de clusters, rejeição de *outliers* que não se enquadram dentro das regiões de densidade (Ester et al, 1996; Kriegel et al, 2011). Ordenação de pontos para identificação da estrutura de clusterização (OPTICS, na sigla em inglês) é um método que permite identificar adicionalmente clusters de densidade variada (Ankerst et al, 1996), e pode ser empregado como uma extensão do algoritmo DBSCAN (Ester et al, 1996), o que facilita a exploração mais minuciosa dos resultados através de gráficos indicando a *reachability distance* entre pontos (Hahsler et al, 2019). Com esse conjunto de algoritmos implementados no script, além dos outputs resultantes da clusterização, é possível propor uma solução flexível em termos hierárquicos, isto é, propor um resultado inicialmente menos detalhado com um panorama mais geral, e posteriormente subcategorizar de maneira mais detalhada alguns grupos de acordo com a *reachability distance* calculada pelo método. Apesar de diversas técnicas de classificação não-supervisionada serem aplicadas em trabalhos relacionados ao mapeamento e classificação do fundo marinho, pouca atenção tem sido dada aos potenciais benefícios e bons resultados que *density-based clustering* pode oferecer nesse campo (Quilleuc et al, 2021).

Os resultados das análises de imagem e da variação angular foram usados como camadas de entrada para a clusterização, com exceção daqueles referentes à frequência de 700 kHz que, por cobrirem uma área menor, não foram considerados para essa análise. Portanto, os dados de entrada foram: mosaicos de backscatter (um para cada frequência), raster da variância GLCM (um para cada frequência), raster dos valores de backscatter para os diferentes setores angulares para cada frequência – totalizando 18 camadas raster (3 mosaicos, 3 rasters variância GLCM, 12 rasters resultantes da ARA).

Antes da execução da clusterização, foram aplicados métodos apresentados em Che Hasan et al (2012) a fim de agregar dados acústicos em segmentos. Para isso, o mosaico RGB de banda composta foi segmentado utilizando o algoritmo *Mean Shift* (Yizong, 1995; Comaniciu & Meer, 2002) no ArcGIS Pro de modo a se obter o máximo de detalhe espectral e espacial, com um limite mínimo de tamanho para cada segmento de 2000 pixels. O output desse processo resultou em 6902 segmentos sobre a área de investigação.

As 18 camadas de entrada foram então empilhadas (função *stacking*) e sobrepostas aos segmentos obtidos a partir da segmentação do mosaico RGB, permitindo a redução do volume de dados em várias ordens de grandeza. Os valores de cada uma das 18 variáveis em cada segmento foram convertidos para formato de matriz no R, e uma análise de componentes principais foi performada de modo a eliminar a colinearidade de variáveis e reduzir ainda mais a dimensão do conjunto de dados sem perder a essência das informações. As duas componentes principais explicam 95.4% da variância total e foram selecionadas para a clusterização.

Os principais componentes foram clusterizados utilizando o algoritmo OPTICS (a partir do pacote DBSCAN no R – Ester et al, 1996; Campello et al, 2013; Hahsler et al, 2019) para identificar os tipos de fundo acusticamente distintos na área de estudo. A *reachability distance* foi plotada primeiramente utilizando os parâmetros (*density Search radius* e *threshold numer of points*) para visualizar e estimar o número de clusteres, e posteriormente um dos grupos foi subdividido em um nível mais fino de detalhamento hierárquico. Os clusteres foram exportados para formato GIS para a produção de mapas de predição e classificação do tipo de fundo.

O esquema na Figura 3-3 indica as principais etapas aplicadas nessa estrutura multimetodológica descrita acima.

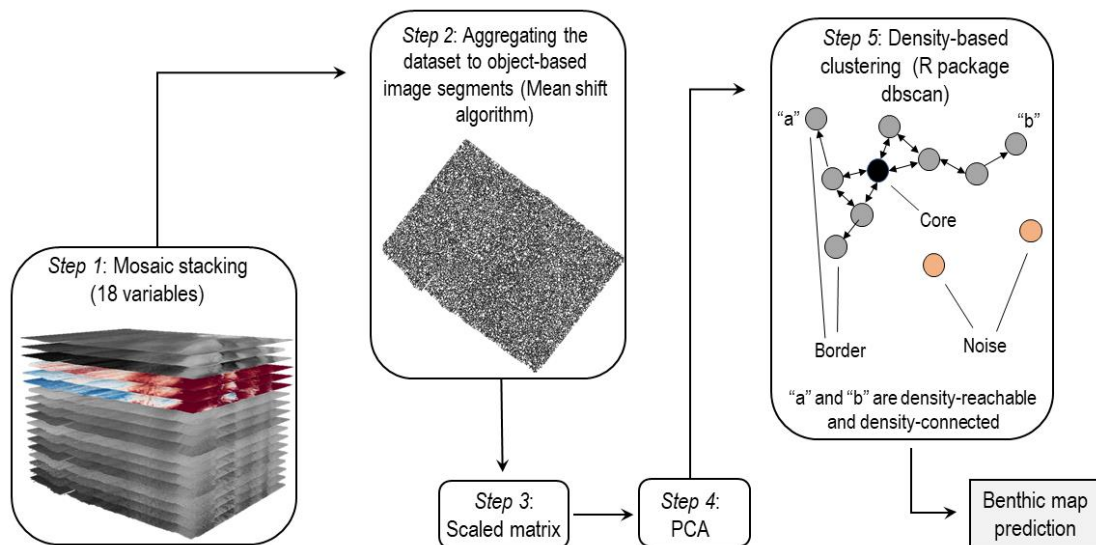


Figura 3-3: Fluxo metodológico indicando as etapas seguidas. O esquema ilustrativo da etapa 5 foi adaptado de Hahsler et al (2019).

2.4. Verdade de campo

Após uma análise preliminar dos mosaicos de backscatter, amostras de sedimento superficial foram coletadas em 12 estações dentro da área de cobertura do levantamento (Figura 3-1). O sedimento foi coletado em 2021 (quase dois anos após o levantamento acústico) usando um amostrador do tipo busca fundo *Van Veen*. Para considerar o intervalo temporal entre os levantamentos acústico e de sedimento, foram verificadas as diferenças e a tendência geral da distribuição sedimentológica (Quaresma et al, 2015; Vieira et al, 2019). A análise granulométrica proveu resultados de porcentagem de cascalho, areia grossa, areia média, areia fina, silte e argila, que foram utilizados como verdade de campo para validação das análises de backscatter.

3. RESULTADOS

3.1. Batimetria multiespectral

As profundidades variaram entre 10 e 32 metros, e o DBM (Figura 3-4) revelou um fundo predominantemente plano e suave, com algumas feições locais mais inclinadas. Essas feições são ainda mais evidentes nos mapas de inclinação e rugosidade, além de feições similares a bancos oblíquos a costa na parte mais profunda.

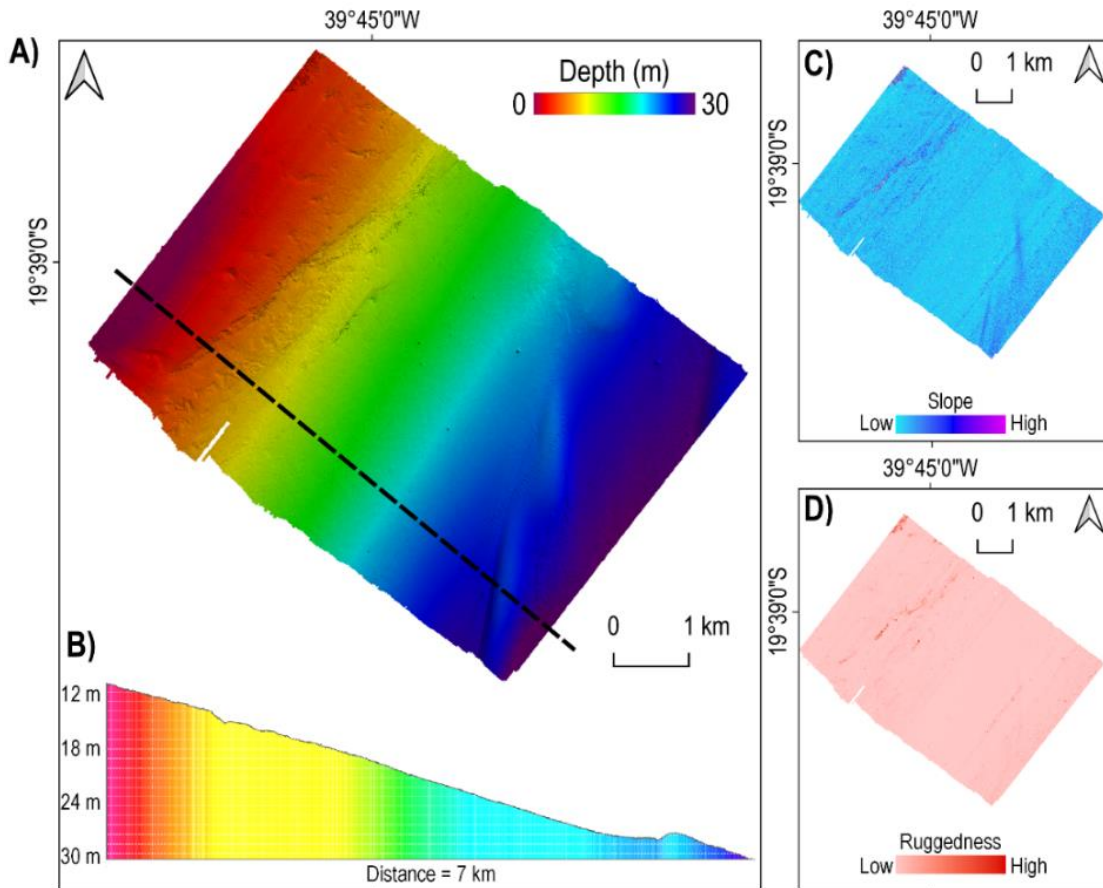


Figura 3-4: a) Modelo digital batimétrico; b) perfil batimétrico; c) mapa de inclinação; d) mapa de rugosidade.

Para análise das diferenças batimétricas devido às diferentes frequências, foram realizadas operações de subtração entre as superfícies batimétricas de cada frequência utilizando ferramentas de álgebra de raster no ArcGIS (Figura 3-5). Em geral, regiões nas imediações das feições mais inclinadas mostraram as maiores diferenças de profundidade entre frequências. As diferenças entre 170 e 280 kHz foram, em média, 0.1 m maiores do que as diferenças entre 280 e 400 kHz, e as diferenças entre 170 e 400 kHz foram ainda maiores. As diferenças entre 170 e 700 kHz foram as maiores observadas, enquanto as diferenças entre 400 e 700 kHz foram três vezes menores. Essas diferenças de profundidade (que alcançaram até 20 cm) observadas estão dentro das expectativas considerando o atual entendimento das interações da onda acústica (eventual penetração e atenuação) de acordo com o tipo de substrato e frequência.

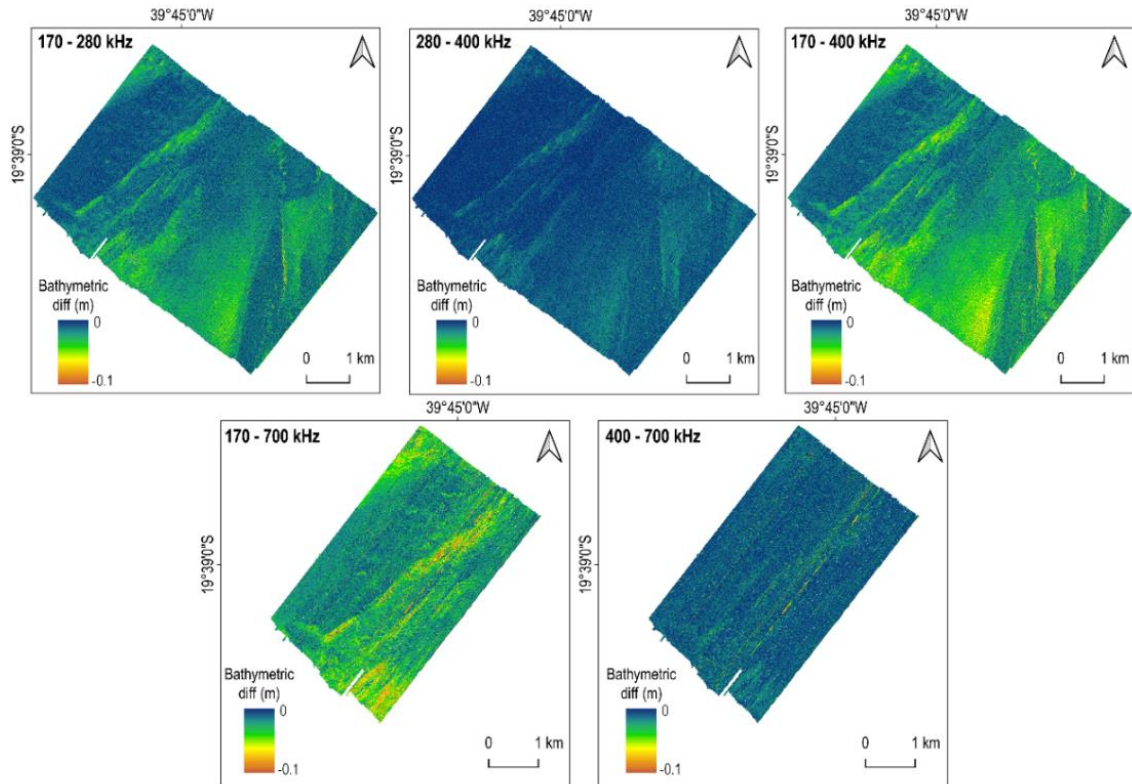


Figura 3-5: Superfícies das diferenças batimétricas computadas a partir da subtração dos modelos batimétricos para cada frequência.

3.2. Backscatter multiespectral

3.2.1. Análise baseada na imagem

Os mosaicos de backscatter para cada frequência estão apresentados na Figura 3-6, com resolução de 1 metro e ajustados com o mesmo intervalo de valores para a escala de cor. Em geral, a região mais rasa possui valores de backscatter menores, e a feição alongada e oblíqua mostra os valores mais altos. Além disso, é possível reconhecer valores mais altos registrados pela frequência mais baixa na maior parte da área investigada.

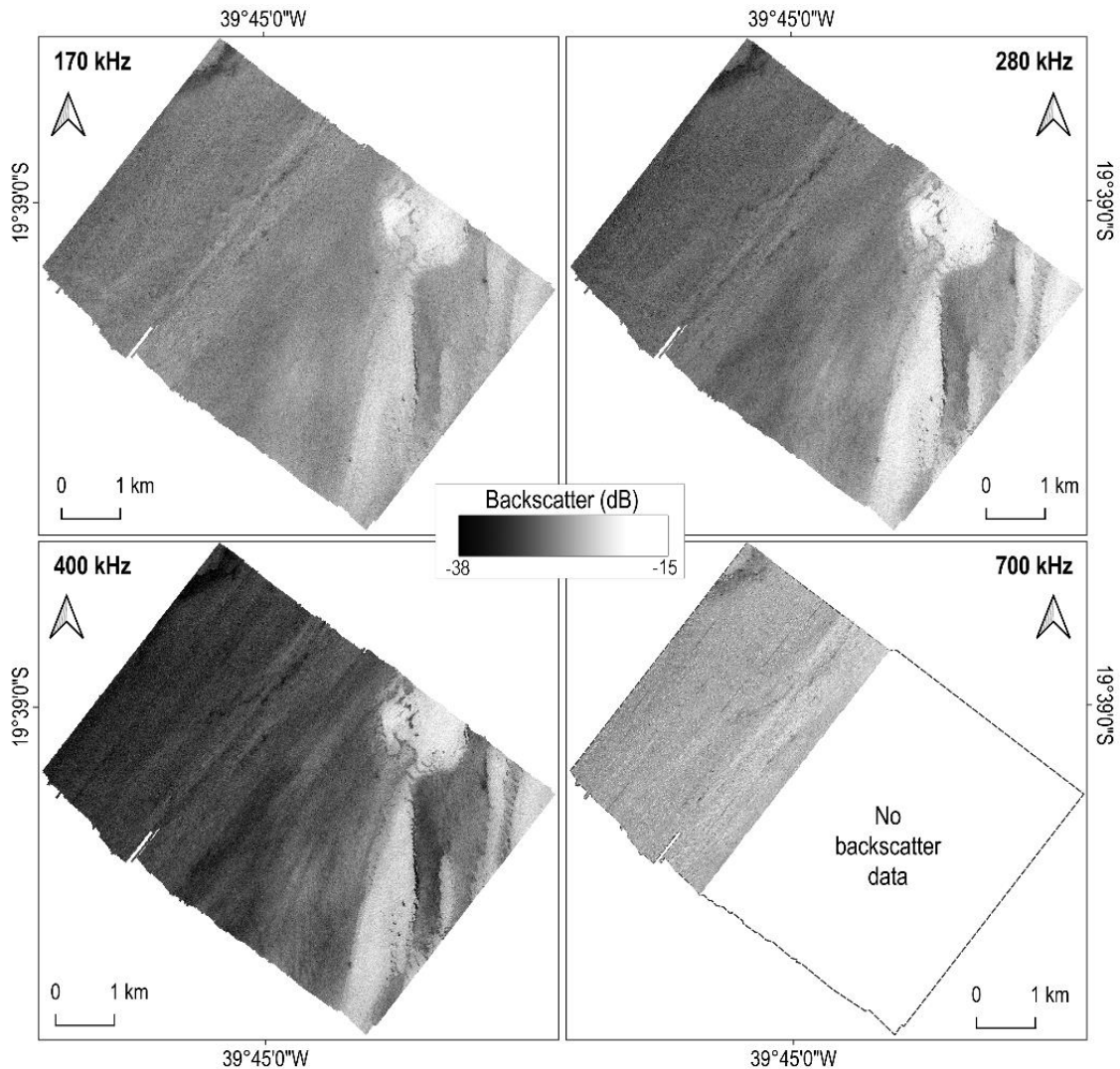


Figura 3-6: Mosaicos de backscatter para cada frequência.

Visualmente, é possível verificar que as maiores diferenças entre as frequências ocorrem em regiões de valores mais baixos de backscatter (exemplo: valores mais altos registrados pela frequência de 170 kHz na maior parte da região mais rasa quando comparada às frequências mais altas); já sobre a feição de alto backscatter que cruza a área (S-N), todas as frequências mostram a mesma tendência (Figura 3-6 e Figura 3-7). Os perfis mostrados na Figura 3-7 sugerem a tendência geral de aumento do backscatter conforme se afasta da costa, além da maior concordância ou menor diferença entre as frequências com esse aumento de profundidade. A frequência de 700 kHz mostra altos valores com possível viés de supersaturação por possíveis inconsistências na aplicação das correções necessárias.

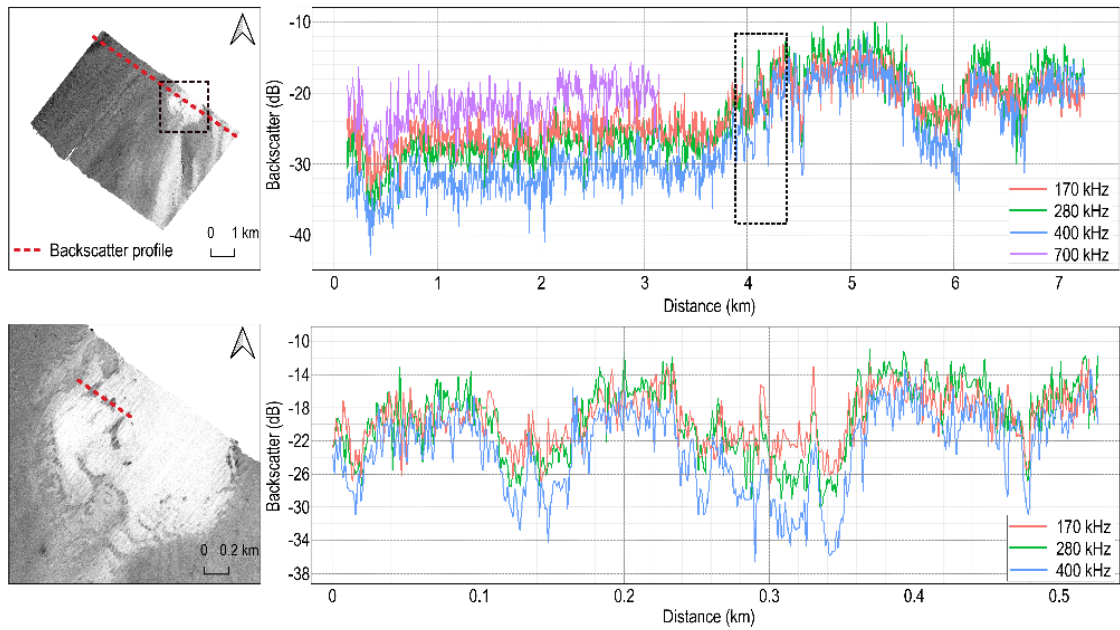


Figura 3-7: Perfis dos valores de backscatter comparando a resposta das diferentes frequências. O perfil da parte superior cruza toda a área de estudo, enquanto o inferior detalha um trecho sobre a feição de alto backscatter.

A fim de facilitar e diversificar a exploração dos dados, os valores dos mosaicos de cada frequência foram plotados na forma de *violin-plot* acompanhados da curva de probabilidade baseada na densidade (kernel) dos dados (Figura 3-8). A menor mediana observada pode ser notada para a frequência de 400 kHz (-30.63 dB); a frequência de 280 kHz mostrou uma mediana levemente mais alta (-26.54 dB) e curva de distribuição dos dados similar à da frequência mais alta – as curvas dessas frequências mais altas reconhecem dois conjuntos distintos principais de valores de backscatter (o maior com valor modal de 27.80 dB para 280 kHz e -31.89 dB para 400 kHz. Já frequência de 170 kHz apresentou a mediana mais alta (-24.97 kHz), com o menor intervalo interquartil (entre Q1 e Q3), o que acaba sendo bem compreendido ao se observar a curva da distribuição dos dados com tendência leptocúrtica e assimetria positiva. O reconhecimento mais evidente de dois grupos principais nas curvas de distribuição também é refletido nos valores de desvio padrão do conjunto de valores de cada frequência, isto é, um desvio padrão menor para a frequência mais baixa, e desvios padrões maiores para as frequências mais altas (170 kHz: 3.35; 280 kHz: 4.64; 400 kHz: 5.09).

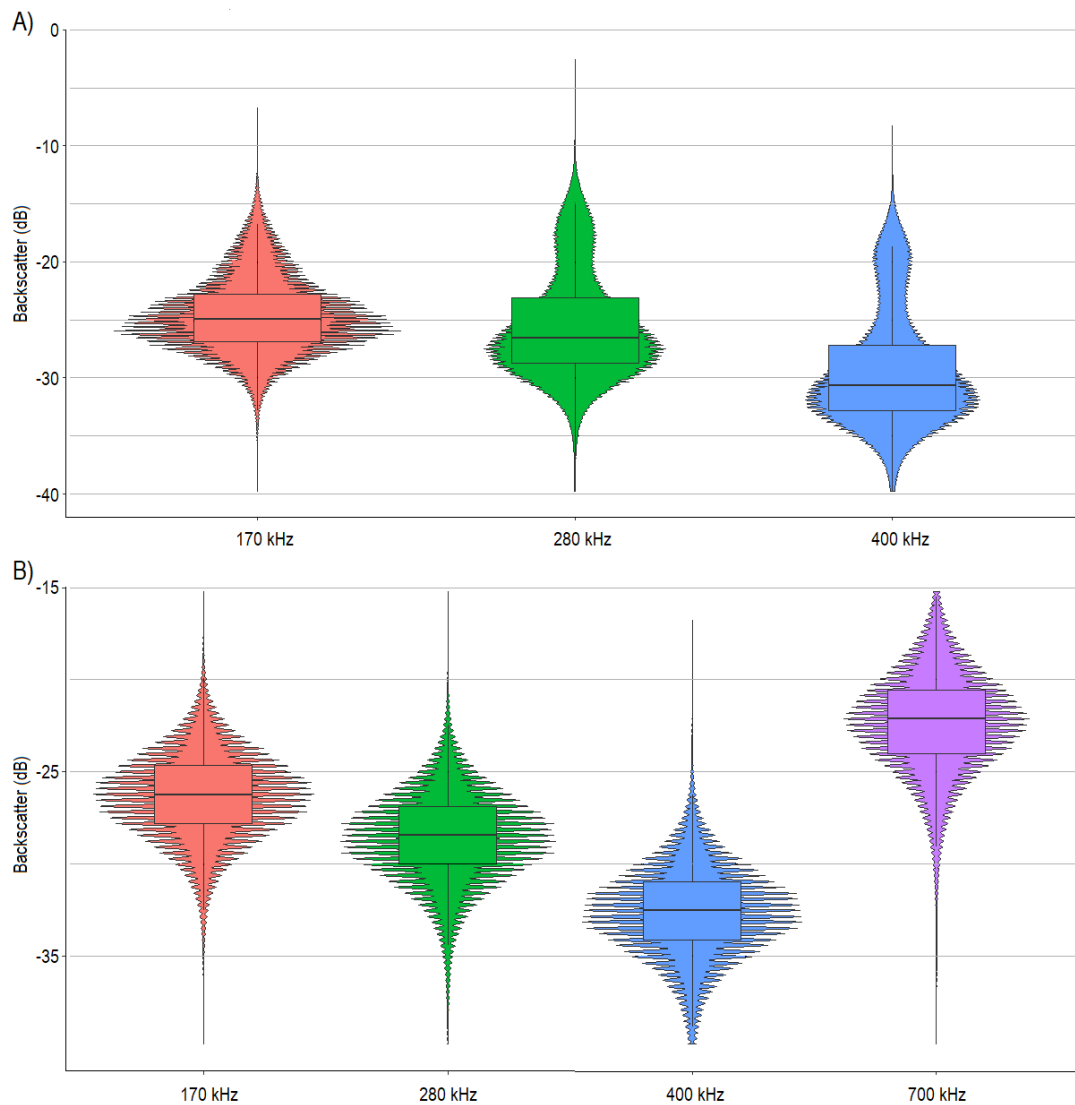


Figura 3-8: Violin plot apresentando os valores de backscatter para cada frequência a) na área inteira; b) na região de cobertura da frequência de 700 kHz.

Sobre a região de cobertura da frequência de 700 kHz (Figura 3-8B), a menor mediana foi observada também para a frequência de 400 kHz (-33 dB). Os formatos similares das curvas de densidade dos dados eram esperados visto que nessa região, a partir de avaliação visual dos mosaicos, o fundo marinho aparenta ser mais homogêneo. Considerando o mosaico supersaturado, faz-se necessária a ressalva de que muito pouco ainda é conhecido acerca da resposta acústica dessa frequência e das correções aplicadas no processamento, exigindo cautela no uso de tais resultados e na aplicação de outras ferramentas (como as que envolvem análise da imagem) para que não se replique possíveis inconsistências. Certamente futuras investigações envolvendo efeitos da turbidez da água na resposta acústica de uma frequência atipicamente alta seria interessante para contribuir com o desenvolvimento desses resultados.

A segunda etapa ainda dentro da abordagem baseada na imagem consistiu na extração de parâmetros texturais dos mosaicos. A tendência geral dos parâmetros extraídos pode ser bem visualizada usando a variância (“glim variance”) – Figura 3-9. Valores maiores apareceram sobre a feição de altos valores de backscatter, especialmente

para a frequência de 280 kHz, enquanto valores mais baixos ocorreram na região de mais baixo backscatter (especialmente para 400 kHz).

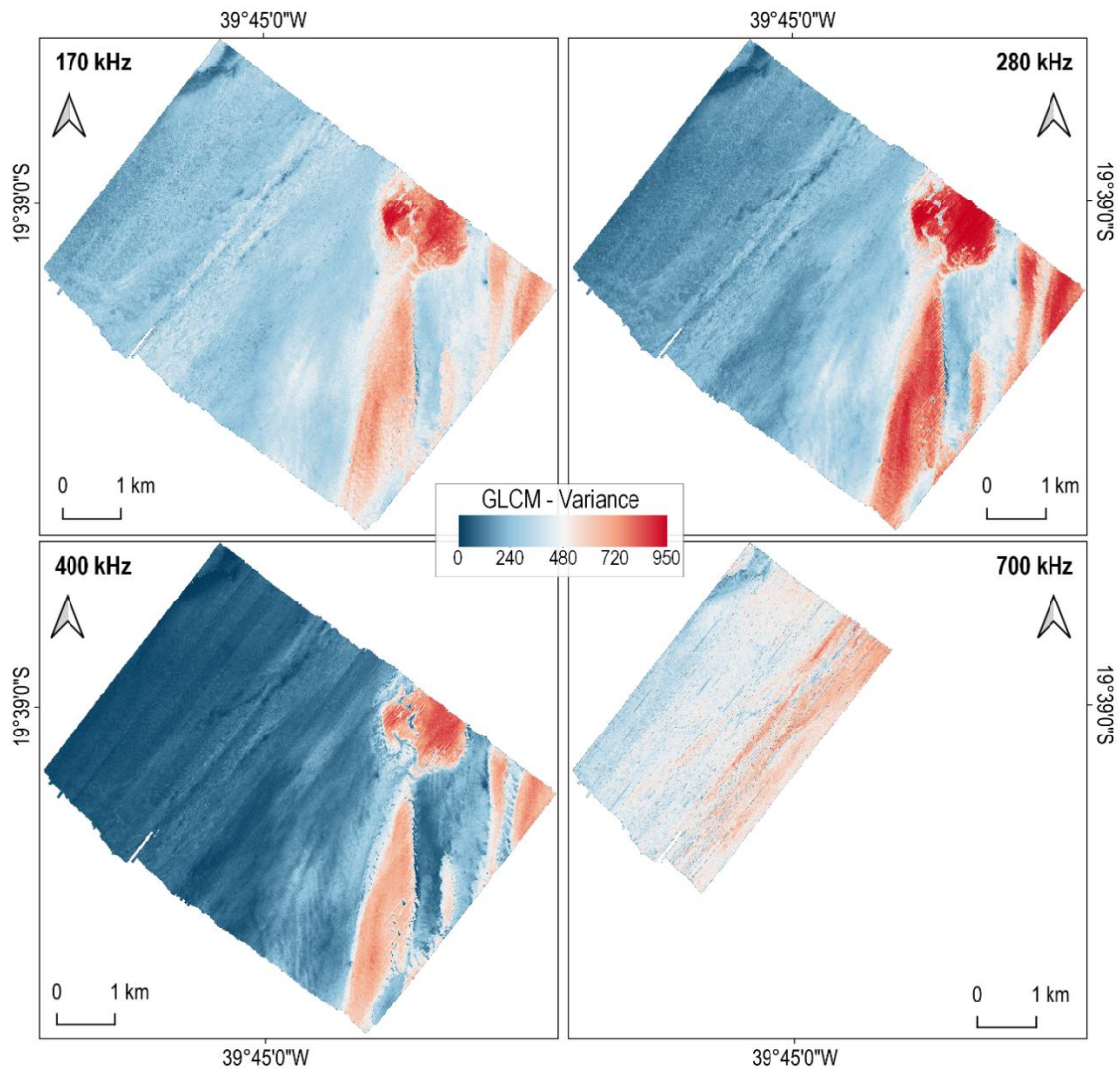


Figura 3-9: Resultados do parâmetro variância extraídos dos mosaicos a partir do script GLCM.

Para terceira e última parte dentro da análise baseada na imagem, os mosaicos de cada frequência foram combinados para construção do mosaico RGB de banda composta (Figura 3-10). A partir dessa representação é possível reconhecer zonas onde todas as frequências mostram de maneira similar valores mais altos de backscatter (regiões esbranquiçadas), que coincidem e se sobrepõem a feição alongada. As zonas mais escuras indicam baixos valores de backscatter para todas as frequências. As maiores diferenças entre as bandas/frequências na área são reconhecidas em tons avermelhados (onde os valores de backscatter da frequência de 170 kHz são mais altos), e em tons azulados estão marcadas as áreas onde a combinação das frequências mais altas registraram maiores valores.

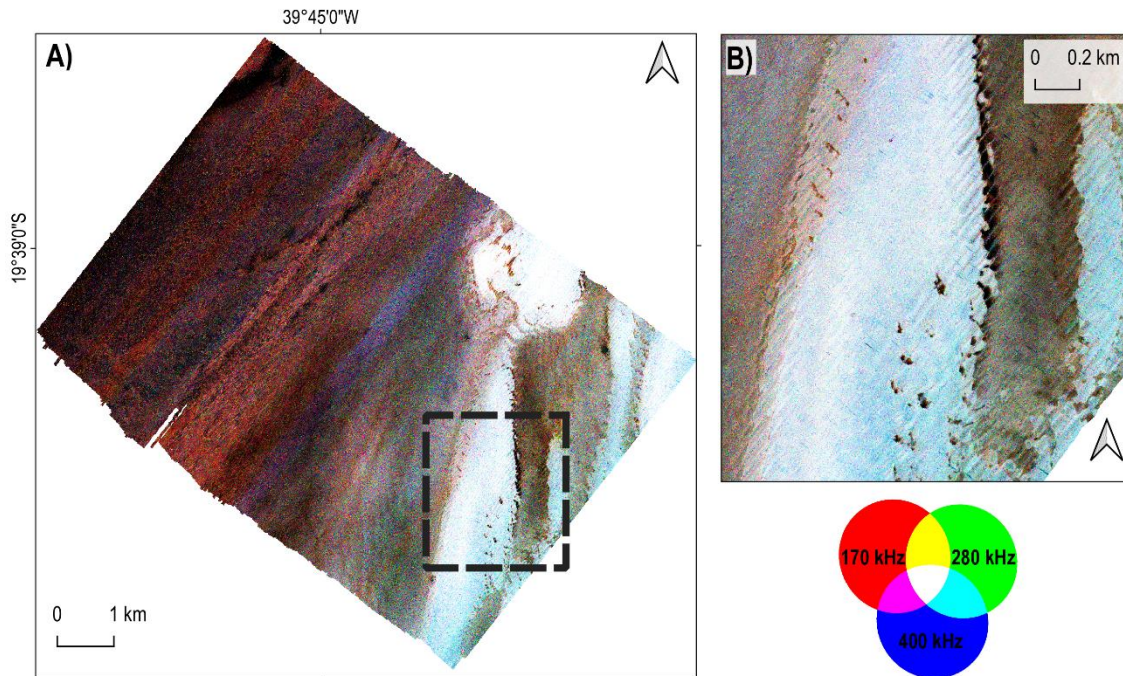


Figura 3-10: Imagem de banda composta (RGB) combinando as três frequências principais do levantamento A) para toda a área de estudo; B) enquadramento aproximando uma região específica da feição de alto backscatter. Os pixels foram ajustados para representar a variação dos valores mínimo e máximo de cada banda, e nenhuma alteração de parâmetros para renderizar as cores foi aplicada (*hue, saturation e contrast*).

3.2.2. Análise da variação angular

A análise baseada na variação angular forneceu resultados que podem ser explorados a partir de abordagens geofísicas e empíricas, incluindo comparação com modelos físicos e interpretação dos parâmetros para distinguir diferentes tipos de fundo (Lurton & Lamarche, 2015). Primeiramente, os valores de backscatter para cada setor angular de cada frequência foram interpolados utilizando método de inverso da potência das distâncias (Inverse Distance Weighting – IDW) no ArcGIS Pro a fim de representar espacialmente grids com células de 1 x 1 m (Figura 3-11). Os resultados demonstraram que, para maior parte da área de estudo, os valores de backscatter diminuiram conforme o ângulo de incidência aumentou; esse mesmo efeito de decréscimo dos valores foi ainda observado com o aumento das frequências, isto é, a frequência mais alta em geral exibe maior perda da intensidade do backscatter nas partes mais externas da varredura quando comparada com as frequências mais baixas. A exceção ocorre sobre a feição de alto valor de backscatter, que marca uma região de alta reflexão ao longo de toda a varredura, com pouca perda para todas as frequências.

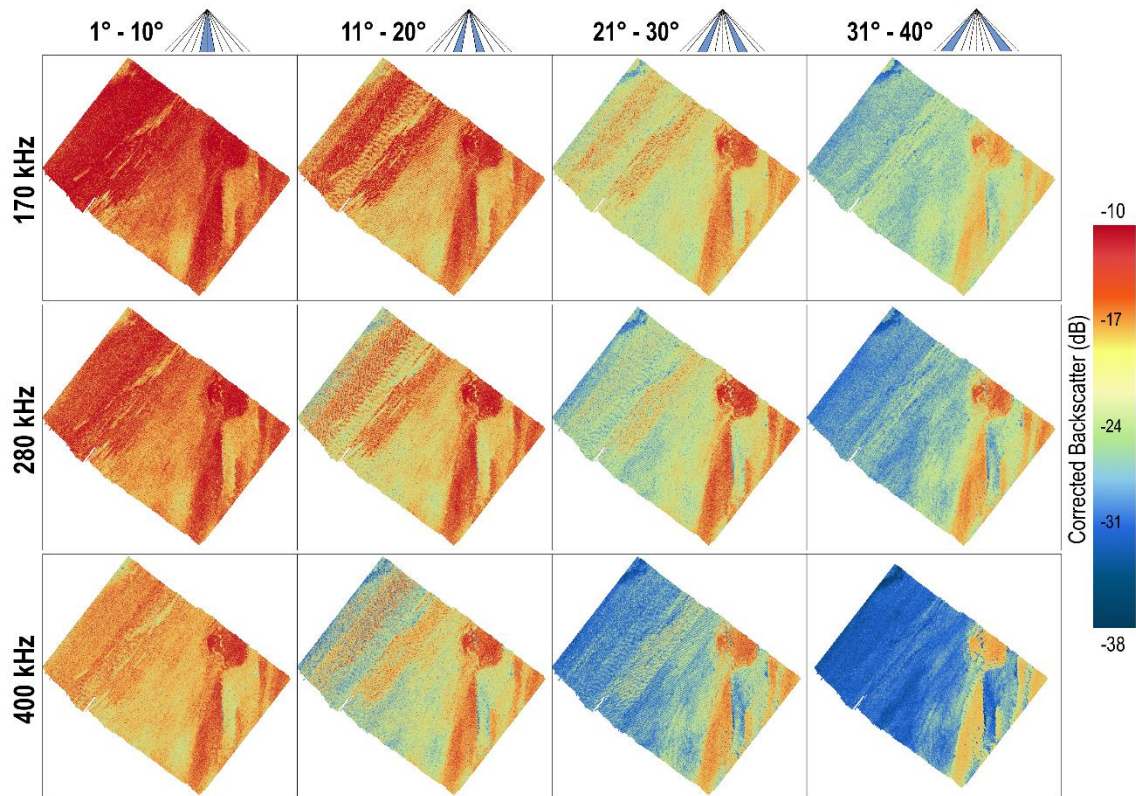


Figura 3-11: Resultados da análise da variação angular obtidos a partir da extração dos valores corrigidos de backscatter para cada setor angular.

O setor angular mais próximo ao nadir (1 - 10°) apresentou resultados similares no espectro de frequências, com altos valores de backscatter cobrindo a maior parte da região. No setor angular entre 11 – 20°, os resultados da frequência mais altas mostraram um maior poder de discriminação do fundo marinho se comparado às frequências mais baixas. Já no terceiro setor, de 21 – 30°, já é possível distinguir visualmente três regiões distintas; além disso, a frequência de 400 kHz nesse setor indica de maneira mais severa que a região mais rasa é composta por um material diferente do que a feição alongada. Valores mais baixos de backscatter foram observados no setor mais externo e distante do nadir (31 – 40°) em praticamente toda a área, principalmente para a frequência de 400 kHz; ainda assim, sobre a feição alongada, altos valores de backscatter persistiram.

Curvas da resposta angular foram extraídas para todas as frequências em cada estação amostral a fim de fornecer características adicionais para descrição da resposta acústica (Figura 3-12). Em uma análise visual, as curvas podem ser descritas em três grupos: i) nas estações Doce 01 e Doce 02, as curvas exibiram formatos semelhantes para todas as frequências, com diminuição dos valores de backscatter conforme a frequência aumenta (com exceção da frequência de 700 kHz); observou-se pouca perda da intensidade do backscatter até os primeiros 20° a partir do nadir, seguido por uma queda acentuada dos valores com o aumento do ângulo de incidência; ii) Doce 07, 09, 11 e 12 apresentaram curvas relativamente mais planas, com altos valores de backscatter e pequena diferença entre as frequências; iii) o terceiro grupo é caracterizado por grande decréscimo dos valores de backscatter para todas as frequências do nadir em direção aos feixes mais externos, e valores mais baixos para a frequência de 400 kHz.

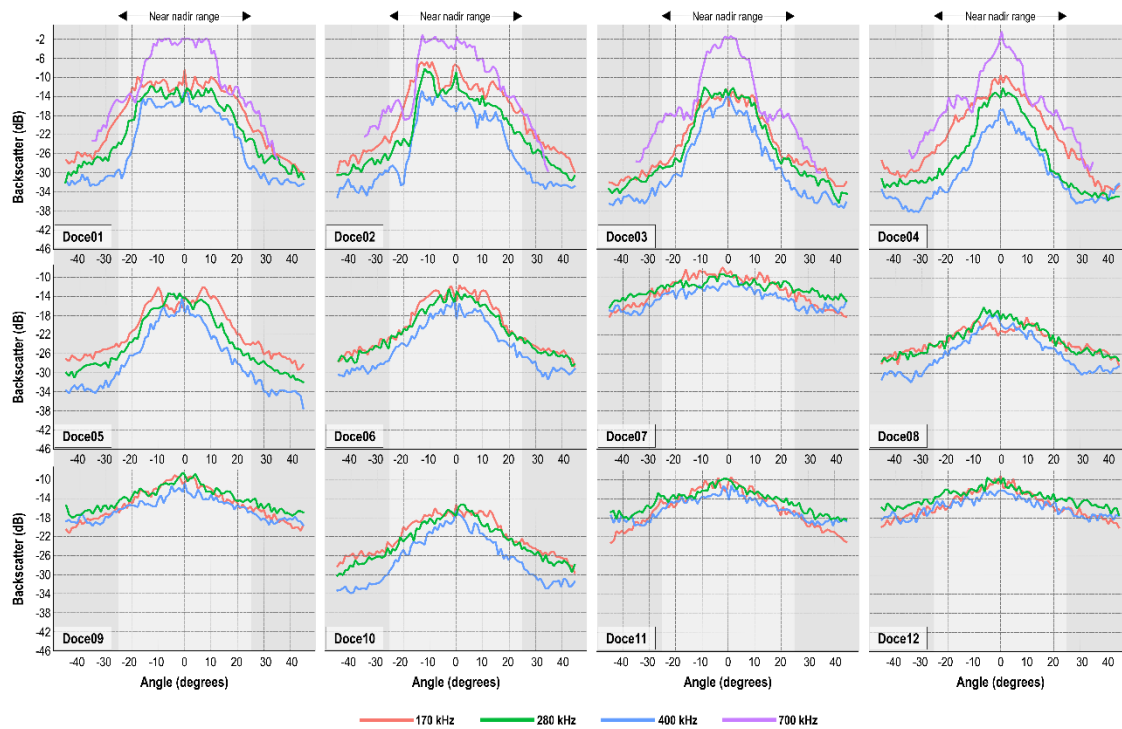


Figura 3-12: Curvas da resposta angular para cada frequência extraídas nas coordenadas das estações amostrais.

3.3. Density-based clustering

A combinação de PCA e *density-based clustering* foi capaz de sintetizar um grande volume de dados resultantes das análises de backscatter para produzir uma proposta de classificação do fundo marinho. A análise de componentes principais reduziu 18 camadas derivadas do backscatter para 2 componentes principais que explicaram a maior parte da variância dos resultados dentro do conjunto de dados (95%), sugerindo substancial colinearidade entre as variáveis.

O gráfico da Figura 3-13 com os agrupamentos de acordo com a *reachability distance* é um dos resultados gerado pelo script OPTICS, que conseguiu identificar os clusters em dois níveis hierárquicos. Baixos valores de *reachability distance* indicam regiões de maior densidade de dados que são separadas eventualmente por picos representando regiões de baixa densidade de dados. Inicialmente, dois grupos mais amplos e bem definidos são evidentes no gráfico a uma *reachability distance* de 0.88 (Figura 3-13 A); tais resultados são coerentes com a tendência geral observada na maior parte das camadas de entrada (Figura 3-6, 3-10 e 3-11), nas quais a área de investigação pode ser separada em altos e baixos valores de backscatter e variância. Ao partirmos pra uma análise mais detalhada do Cluster 1 – que se distribui por toda área de investigação (Figura 3-14A), a uma *reachability distance* de 0.48, é possível subdividi-lo em 4 sub agrupamentos (Figura 3-13 B).

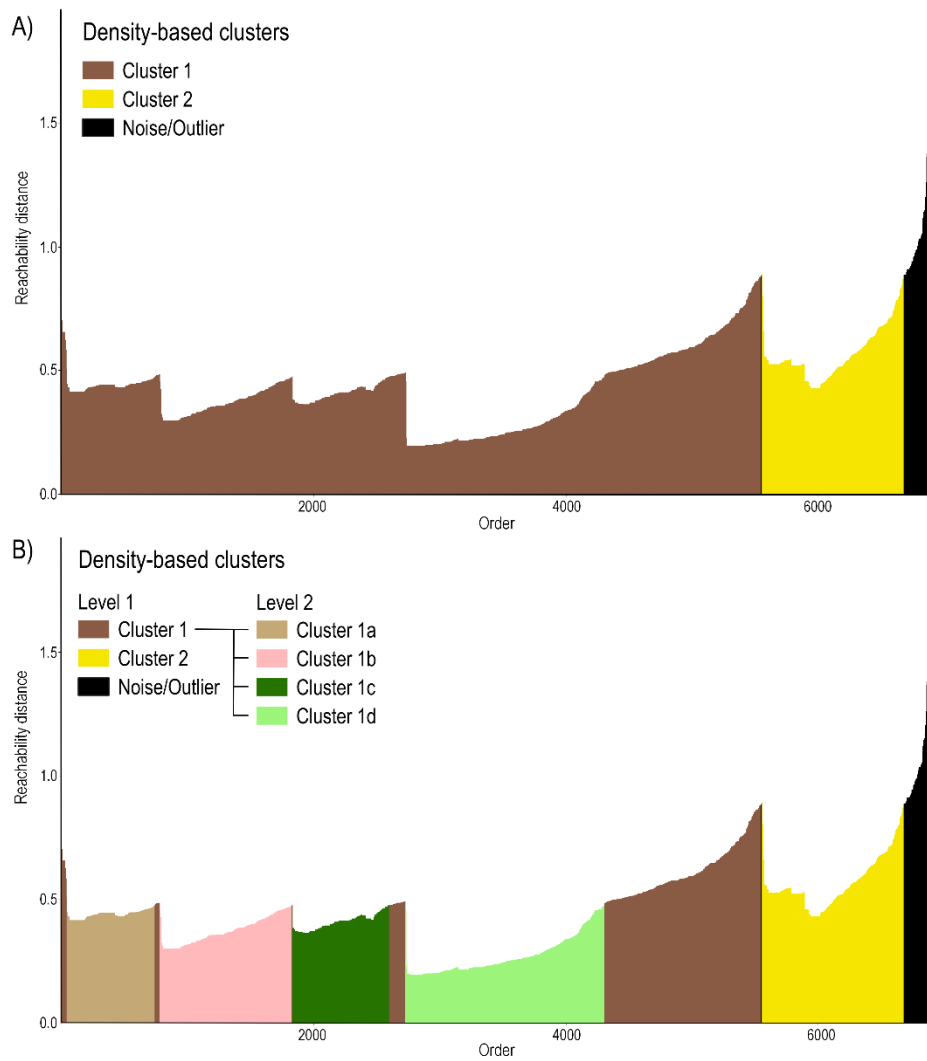


Figura 3-13: Gráfico com os agrupamentos considerando: A) dois clusters principais (*reachability distance* = 0.88) e ruídos; B) clusters detalhados (*reachability distance* = 0.475).

Esses clusters em um nível hierárquico mais refinado mostram certo gradiente a partir da costa (Figura 3-14B), o que não é possível notar facilmente em uma análise visual nas camadas de entrada. Os *outliers* ou ruídos aparecem principalmente sobre as regiões de valores de backscatter extremamente altos e os mais baixos.

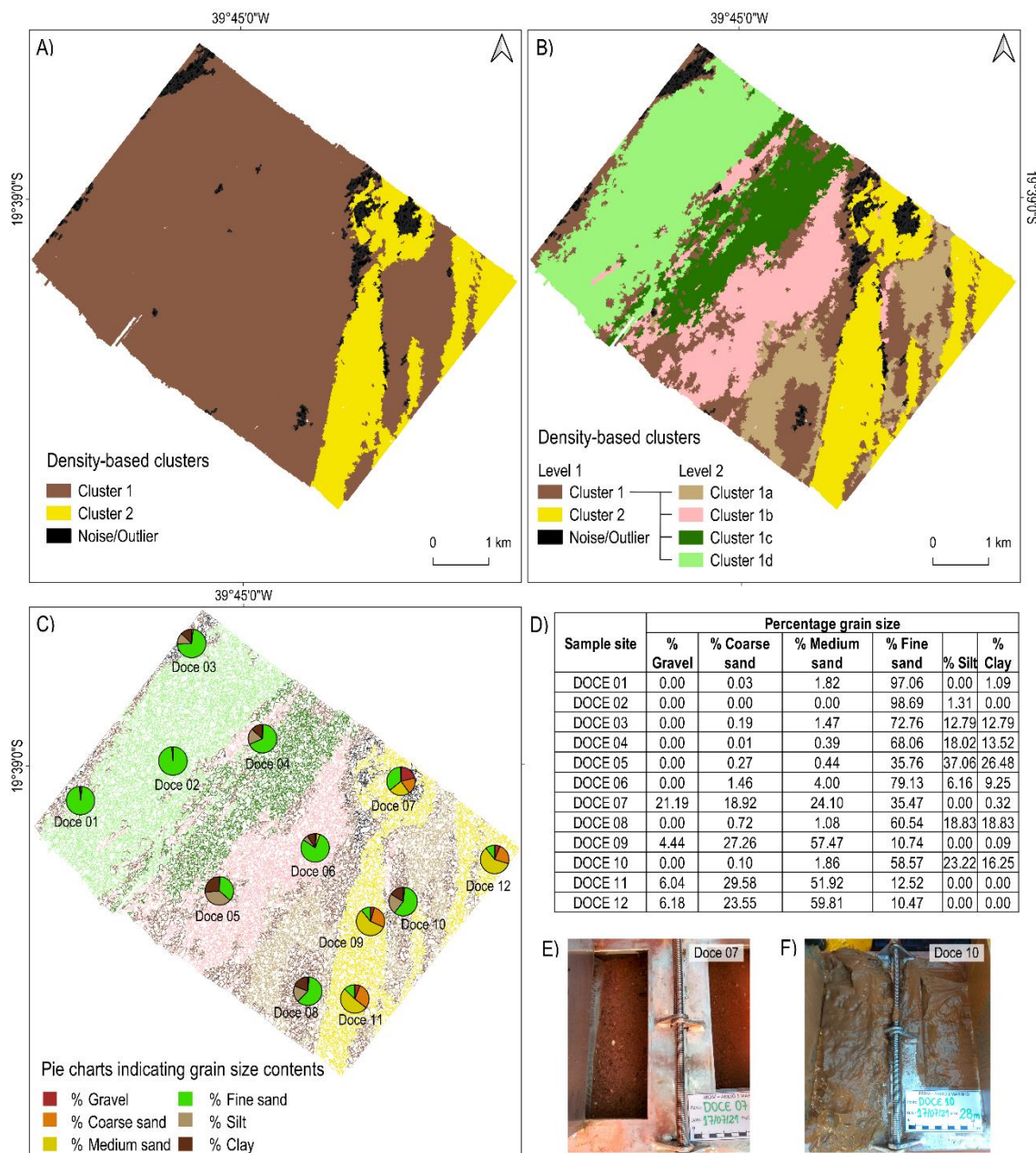


Figura 3-14: A) Mapeamento com a predição de classes com base nos resultados do *density-based clustering* considerando duas classes principais; B) mapeamento a um nível de detalhe hierárquico mais refinado; C) resultados granulométricos sobrepostos à predição das classes; D) resultados de cada fração granulométrica para cada estação amostral; E) foto de sedimento arenoso (DOCE 07); F) foto de sedimento mais fino (DOCE 10).

3.4. Granulometria

Os resultados da análise granulométrica (Figuras 3-14 C e D) mostram que as amostras nas estações Doce 01 e Doce 02 são compostas primariamente de areia fina. Doce 03 e Doce 04 compartilham valores similares de teor de lama e ambas as estações estão situadas próximas à anomalias batimétricas (regiões com altos valores de inclinação e rugosidade). Doce 05, Doce 08 e Doce 10 (Figura 3-14F) apresentaram maiores teores de lama, enquanto as amostras localizadas sobre a feição de altos valores de backscatter (Doce 07, 09, 11 e 12) tiveram maior conteúdo da fração arenosa (média e grossa), com pequenas quantidades de lama.

Embora não haja quantidade de amostras suficientes para estimar a acurácia da classificação, as classes distinguiram tipos de fundo distintos através da combinação dos resultados de maneira satisfatória. A Tabela 1 sumariza as principais propriedades para cada cluster.

Tabela 3- 1: Características de cada cluster.

	Estações amostrais	Curvas de resposta angular	Propriedades do sedimento
Cluster 1	Doce 04, 05, 08 e 10	Diminuição acentuada dos valores de backscatter conforme aumento do ângulo de incidência	Predominantemente lamoso e areia fina
Cluster 1a	-	-	-
Cluster 1b	Doce 06	Diminuição acentuada dos valores de backscatter conforme aumento do ângulo de incidência	Predominantemente composto por areia fina, com mais de 10% de lama
Cluster 1c	-	-	-
Cluster 1d	Doce 01 e 02	Diminuição acentuada dos valores de backscatter após os 20° em direção aos feixes externos	Mais de 95% de areia fina
Cluster 2	Doce 09, 11 e 12	Formato mais plano, com pouca perda da intensidade do backscatter ao longo da varredura	Predomínio de areia média, com menos de 10% de cascalho
Ruídos	Doce 03 e 07	Alta perda angular (Doce 03) e baixa perda angular (Doce 07)	Areia fina com menos de 30% de lama (Doce 03); areia cascalhosa (Doce 07)

O Cluster 1 possui sobreposição com o maior número de amostras e pode ser caracterizado como lamoso/areia fina. Já o Cluster 2 é composto de areia média, com pequena quantidade de areia grossa. Partindo para descrição do nível hierárquico da classificação mais detalhada, o Cluster 1a não possui nenhuma estação amostral que permita fazer um cruzamento ou validação com dados granulométricos, mas sugere uma transição entre os clusters 1 e 2. Cluster 1b apresenta características próximas às do Cluster 1a, como o alto teor de lama e características morfológicas que decorreram em uma resposta mais suave do backscatter. Cluster 1c também não se sobrepõe a nenhuma estação de coleta de sedimento e demonstra semelhança com o 1b de acordo com a resposta acústica nos diferentes setores angulares (Figura 3-11). Cluster 1d possui duas amostras e pode ser definida como areia fina. Algumas áreas que não foram classificadas (em preto, indicando os ruídos) poderiam ser ainda interpretadas como dois clusters adicionais indicando dois tipos de substrato – um com maior conteúdo de areia grossa e cascalho, e outro sugerindo um fundo lamoso; vale a ressalva de que existe a possibilidade deste último mencionado ter sofrido modificações durante o período transcorrido entre a aquisição dos dados acústicos e da coleta de sedimento.

4. DISCUSSÃO

Dados de backscatter vem sendo analisados de maneiras variadas para classificação do fundo marinho, incluindo interpretação de mosaicos, análises de parâmetros texturais (Runya et al, 2021), análises com segmentação baseada em imagens (Ierodionou et al, 2018), e técnicas envolvendo a dependência e variação angular (Fonseca & Mayer, 2007). Vantagens e desvantagens de cada abordagem fazem com que a escolha do método torne-se desafiadora, e o uso combinado pode alcançar resultados melhores pelo fato de se aproveitar a resolução espacial dos mosaicos com o nível de informação mais detalhado fornecido pela ARA (Fonseca et al, 2009; Che Hasan et al, 2014). Já em termos de classificação, diversas técnicas supervisionadas e não-supervisionadas vêm sendo empregadas no campo de mapeamento do fundo marinho (Stephens & Diesing, 2014; Diesing et al, 2020) e incorporadas em algoritmos de segmentação, incluindo diferentes métodos de clusterização (Le Bas, 2016; Masetti et al, 2018). *Density-based clustering* tem recebido pouca atenção e vem sendo pouco explorada como ferramenta para classificação do fundo marinho, e foi executada aqui com sucesso, sintetizando resultados de diferentes abordagens para produzir uma proposta de classificação do fundo marinho.

4.1. Classificação e predição bêntica

O grande volume de dados de entrada resultante das múltiplas análises e frequências tende a ser um fator desfavorável para sintetizar os dados espacialmente, ainda que a técnica *density-based clustering* consiga identificar unidades do fundo marinho de maneira bem objetiva, inclusive sob circunstâncias que envolvam um pequeno número de informação direta ou verdade de campo. No caso apresentado nesse capítulo, os mosaicos de backscatter (Figura 3-6) e o mosaico de banda composta RGB (Figura 3-10) sugerem potencialmente duas ou três classes de fundo, enquanto as curvas de resposta angular nas estações amostrais (Figura 3-12) indicam pelo menos três classes. Os atributos calculados a partir do script GLCM somados às análises de diferentes setores angulares agregam grande volume de informação e acabam dificultando uma solução para classificação desse enorme conjunto de dados, e tornando uma classificação ou segmentação manual quase inviável. A combinação aplicada de segmentação da imagem, redução dimensional e *density-based clustering* alcançou uma solução adequada e objetiva para sintetizar os dados espacialmente e reconhecer tipos de fundo distintos. Soluções similares também propuseram PCA para redução dimensional de dados de backscatter para classificação de dados de backscatter utilizando *k-means clustering* (Alevizos et al, 2018), e outras abordagens com direcionamentos similares também acabam incluindo uma combinação de ferramentas e técnicas – *fuzzy clustering* (Chakraborty et al, 2015), *Bayesian probability estimation* (Amiri-Simkooei et al, 2009; Simons and Snellen, 2009).

Várias propriedades da técnica de *density-based clustering* são importantes e desejáveis em um contexto exploratório de dados, incluindo a identificação automática do número de clusters, visualização simples e aprimorada das soluções hierárquicas da clusterização, e a rejeição de *outliers* que são dissimilares ou não se enquadram nos clusters definidos. Exemplo disso é visto em uma parte dos dados identificados como *outliers* ou ruído pelo algoritmo OPTICS está localizada na região de mais alto backscatter, onde a análise granulométrica mostrou o maior teor de cascalho e areia grossa (que em uma interpretação subjetiva poderia ser inclusive enquadrada como uma nova classe). Essas qualidades acabam consistindo em lacunas se outras abordagens comuns e bem difundidas são consideradas (*k-means*, *ISSO*, *agglomerative clustering*), apesar de serem

proveitosas para classificação do fundo marinho onde as mudanças de características são gradacionais ou não são tão bem diferenciadas.

Quantificar as vantagens do uso de backscatter multiespectral como classificador para diferentes tipos de fundo ainda é um caminho complexo a ser trilhado e sai um pouco do escopo desse capítulo, mas os resultados sugerem que os dados acústicos em múltiplas frequências fornecem um maior poder de discriminação em fundos com sedimentos lamosos/areia fina do que em sedimentos mais grossos (o que é coerente com outros estudos – Gaida et al, 2018; Brown et al, 2019; Costa et al, 2019). Investigações envolvendo dados de backscatter multiespectral em uma variação maior de tipos de fundo ainda são fundamentais para melhor compreensão e consolidação do potencial dessa tecnologia no que tange a discriminação de tipos de fundo. Vale destacar que essa é a primeira aplicação do método *density-based clustering* nesse contexto multifrequência, e comparações com resultados oriundos de outras técnicas de classificação também poderiam ser interessantes.

4.2. Explorando a resposta do backscatter multiespectral através da análise baseada na imagem e ARA

Apesar das limitações associadas ao uso do backscatter não-calibrado, isto é, dados provenientes do mosaico - que acaba interpolando dados para melhor espacialização e visualização em detrimento da retenção da informação angular (Lurton & Lamarche, 2015; Schimel et al, 2018; Malik et al, 2019), os resultados forneceram uma linha de base adequada para interpretação de diferentes tipos de fundo. Na maior parte da área de estudo, os mosaicos exibiram valores baixos de mediana do backscatter para todas as frequências (levemente mais alta para a frequência mais baixa), o que é característico de depósitos lamosos (Brown et al, 2019; Diesing et al, 2020). Cabe ressaltar que as características do depósito subsuperficial podem influenciar a resposta acústica, especialmente nas frequências mais baixas (Jackson & Richardson, 2007; Williams et al, 2009; Feldens et al, 2018). A resposta acústica sobre a feição arenosa de alto backscatter (tanto para abordagem baseada na imagem como nos resultados da ARA) é influenciada principalmente pela reflexão superficial desse tipo de fundo – o termo cunhado para essa situação é *interface scattering*, mas ainda assim outros aspectos ainda podem ser mais detalhadamente observados, como por exemplo a influência da direção de navegação/azimute no que tange à incidência acústica no fundo marinho (Lurton et al, 2018), presença de formas de fundo e variação da microtopografia, e até mesmo mais informações diretas do sedimento para checar a variabilidade lateral.

A aplicação da tecnologia multiespectral foi capaz de fornecer um maior poder de discriminação do fundo marinho com base nas diferentes respostas das frequências, resultando e alcançando uma predição de classes mapeadas concordante com estudos prévios na região (Quaresma et al, 2015; Vieira et al, 2019), e tornando possível detalhar e aprimorar a classificação do fundo marinho. Quaresma et al (2020) encontraram menores valores de densidade do sedimento superficial na região mais rasa próximo ao depocentro lamoso (Figura 3-1), e altos valores de densidade ($>1400 \text{ kg/m}^3$) em regiões com profundidades maiores do que 30 m. Nos mosaicos apresentados, em geral os menores valores de backscatter situaram-se próximos às bordas das feições mais inclinadas (ver mapa de declividade – *slope* - Figura 3-4) e nas bordas da feição alongada e arenosa; nessas regiões as diferenças batimétricas entre as frequências (Figura 3-5) alcançaram até 10 cm, indicando uma acumulação de sedimento mais fino possivelmente influenciado pela morfologia local. Nessas regiões, presume-se que a frequência mais baixa está detectando características sub-superficiais, enquanto as frequências mais altas refletem primariamente a interface mais superficial do fundo marinho, indicando assim um depósito lamoso nessa área. Embora os

resultados de atributos da batimetria (por exemplo, declividade, rugosidade, diferenças batimétricas) atuam de maneira secundária quando comparados aos dados de backscatter nesse trabalho, eles podem eventualmente corresponder a importantes proxies para classificação do fundo (Walbridge et al, 2018; Lucatelli et al, 2019), e alguns desses parâmetros derivados da batimetria podem inclusive ser mais importantes ou significativos do que a própria batimetria (Trzcinska et al, 2020).

A análise da imagem de banda composta demonstrou ser uma ferramenta interessante para visualização dos resultados de maneira integrada, facilitando o reconhecimento de regiões onde todas as frequências indicam características similares para determinados tipos de fundo (por exemplo, tons mais escuros indicando fundo lamoso, e tons esbranquiçados indicando fundo arenoso). Além disso, a análise visual do mosaico RGB também permite identificar diferenças nas respostas acústicas em algumas regiões, como em regiões mais avermelhadas próximas às estações Doce 01 e Doce 02 indicando altos valores de backscatter para a frequência mais baixa, e regiões marcadas em tons de azul claro próximas à estação Doce 11, cuja coloração indica a combinação de altos valores de backscatter para as bandas de frequências mais altas (280 e 400 kHz) – Figura 3-10B. Quantificar o ganho devido ao uso dessa ferramenta ou método está além do escopo desse capítulo, mas os resultados foram fundamentais para a etapa de segmentação dos dados que precedeu a redução dimensional, e registraram novas informações acerca da assinatura espectral de diferentes tipos de fundo, além de contribuírem na consolidação do potencial de refinar a diferenciação e classificação do fundo utilizando backscatter multiespectral.

Resultados gerados a partir da análise GLCM forneceram informações que podem auxiliar no entendimento e interpretação das propriedades geoacústicas do fundo marinho. Jackson & Briggs (1992) propuseram e estabeleceram que o fator *scattering interface* é dominante no controle da reflexão e retroespalhamento acústico em fundos arenosos, enquanto o fator relacionado a heterogeneidade do volume do depósito torna-se gradualmente mais importante em fundos com maiores teores de lama. Os resultados apresentados aqui mostraram maiores valores de variância na feição arenosa, o que reflete os maiores valores de backscatter em termos de tons de cinza (particularmente na frequência de 280 kHz), isto é, valores maiores são representados por tonalidades mais claras que por sua vez possuem um valor maior na escala de cinza (0 – 255). Hughes Clarke (2015) também notou um aumento da intensidade do backscatter sobre fundos arenosos com o aumento da frequência, ainda que incertezas associadas a classificação textural possam ser levantadas devido a medida de rugosidade do fundo ser diretamente dependente do comprimento de onda empregado. Mais próximo da desembocadura do rio Doce, diferenças na variância podem estar mais relacionadas com outras variáveis que também influenciam a resposta do backscatter, como a espessura e homogeneidade do depósito subsuperficial. Portanto, além de somar informações para a classificação, a variância textural calculada pelo script GLCM contribuiu para interpretações visuais, fornecendo resultados que ajudam na análise e classificação do fundo marinho (Samsudin & Hasan, 2017; Runya et al, 2021).

Em teoria, os dados de backscatter insonificados no intervalo entre 30° - 60° (ou seja, afastado do nadir mas ainda não englobando os feixes mais externos – *far-nadir region*) são considerados ideais para múltiplos propósitos associados ao mapeamento do fundo marinho (Lucieer et al, 2018). Contudo, a utilidade e proveito de cada setor angular pode alterar conforme a frequência, o que torna a extração dos valores de backscatter em cada setor angular uma ferramenta com potencial de melhorar e otimizar as informações para classificação dos dados. O setor de 1 – 10° mostrou em geral trechos de dados associados a reflexão especular, além de ter apresentado baixo contraste entre os diferentes tipos de fundo (o que pode ser verificado visualmente na Figura 3-11) principalmente

para a frequência mais baixa. Os dados extraídos entre 11 – 20° mostraram informações interessantes, principalmente na frequência de 400 kHz que visualmente apresentou mais diferenciação do fundo; além disso, uma peculiaridade interessante ocorreu na região com areia fina (estações Doce 01 e Doce 02): as curvas angulares nesses locais mostraram pouca perda da intensidade do backscatter com o aumento do ângulo de incidência nos primeiros 20°, seguida por um forte decréscimo dos valores de backscatter nos feixes mais externos. Os dados do setor entre 21 – 30° permitiram melhor distinção visual dos tipos de fundo para as frequências mais baixas (170 e 280 kHz), enquanto o setor mais externo e afastado do nadir destacou em todas as frequências a feição alongada e arenosa do restante da área, mostrando em geral alto contraste entre a região arenosa e a região de sedimento mais fino/lamoso. Dessa forma, enquanto a distinção de regiões arenosas e lamosas não tenha sido sempre clara utilizando métodos baseados na imagem, o uso do backscatter em múltiplas frequências em diferentes setores angulares obtiveram melhor performance para tal diferenciação, além de indicar e corroborar os benefícios de combinar as abordagens de análise para alcançar uma melhor diferenciação do fundo marinho (Che Hasan et al, 2012; Ierodionou et al, 2018).

Os resultados da ARA parecem corresponder satisfatoriamente com a composição das amostras de sedimento; aqueles com maior proporção de conteúdo lamoso mostraram maior diferença entre frequências e uma maior taxa de decréscimo dos valores de backscatter com o aumento do ângulo de incidência quando comparados com as amostras descritas com sedimentos mais grossos. Essa tendência foi mais aparente na frequência de 400 kHz. Gaida et al (2018) observaram o formato da curva da resposta angular com tendência a se apresentar mais plano conforme a frequência aumenta (dentro da variação aplicada no estudo) em fundos de sedimento fino, o que os autores atribuíram a maior sensibilidade na detecção da rugosidade com comprimentos de onda menores. No caso apresentado nesse capítulo, as curvas da resposta angular extraídas sobre estações de amostras arenosas (Doce 07, Doce 09, Doce 11 e Doce 12) exibiram um formato mais plano, similarmente e em concordância com o que é visto em modelos acústicos (Applied Physics Laboratory, 1994). Combinando essas observações com o restante dos resultados já apresentados e discutidos, pode ser concluído que quanto mais plana é a curva, melhor é observado e reconhecido fundos de areia média/grossa na análise textural, corroborando o fator *scattering interface* como sendo o preponderante em termos da influência acústica nesse tipo de fundo. Derivar e definir tendências entre backscatter e frequência em variados tipos de fundo ainda é uma dificuldade e uma lacuna, a exemplo do que foi apresentado por Trzcinska et al (2021) na tentativa de sumarizar valores de backscatter e curvas de resposta angular a partir de diferentes estudos em diferentes tipos de fundo. O backscatter multiespectral facilitou essa relação com resultados mais densos fornecendo mais assinaturas espectrais em um mesmo local. Comparando com o estudo mencionado, aqui foram observados valores mais altos de backscatter para altas frequências em fundos de areia fina, o que apareceu de maneira similar para fundos de areia muito fina em Trzcinska et al (2021); valores de backscatter mais altos encontrados aqui para 280 kHz em fundos de areia média, semelhante ao que foi apresentado para areia cascalhosa em Trzcinska et al (2021); já em fundos lamosos, a relação torna-se mais complexa devido a heterogeneidade da subsuperfície. Para melhor compreensão dos resultados, certamente seria interessante incluir algumas análises do depósito subsuperficial (como perfilador de subfundo ou até mesmo amostras de sedimento subsuperficial) e buscar uma ARA ainda mais detalhada em intervalos angulares menores com maior número de amostras diretas de sedimento.

A variabilidade do fundo marinho dentro da varredura (*swath*) é um dos pontos de atenção ao se trabalhar com a análise angular, mas a aplicação combinada da segmentação da imagem RGB antes da extração de diferentes

setores angulares e posterior clusterização das variáveis de ambas as abordagens demonstrou ser uma maneira eficiente na integração de métodos e para exploração do conjunto de dados de forma mais adequada e aprofundada. A aplicação e combinação das abordagens propostas ainda é tema escasso na literatura científica, ainda mais considerando backscatter multiespectral, e demonstrou boa performance e potencial para explorar as vantagens de cada método usando conjunto de dados de múltiplas frequências, ainda que não se envolva preditores derivados da batimetria.

5. CONCLUSÃO

O método de clusterização aplicado permitiu a integração dos resultados de múltiplas abordagens e conseguiu gerar uma classificação não-supervisionada detalhada para melhor compreensão do fundo marinho a partir de dados acústicos multiespectrais. Ambas as abordagens baseadas na imagem e na variação angular compuseram peças importantes para entrada no modelo de classificação, e a combinação das análises contribuiu para garantir que todas as informações relevantes tenham sido extraídas e incluídas no resultado. Enquanto os mosaicos de backscatter juntamente com o mosaico de banda composta (RGB) e as curvas de resposta angular tenham potencialmente sugerido duas ou três classes, a clusterização final identificou dois grandes agrupamentos, com 4 subclasses dentro do Cluster 1, que corresponderam de maneira próxima e satisfatória às amostras de sedimento coletados na região. Além disso, a ARA sugeriu que as informações dos diferentes setores angulares podem ser proveitosas para diferentes tipos de fundo, e ainda que o melhor setor angular em termos de distinção do fundo marinho pode não ser o mesmo para diferentes frequências; por exemplo, o setor de 11-20° obteve um maior poder de discriminação para a frequência mais alta, enquanto o setor de 21-30° pareceu visualmente mais adequado para diferenciação dos tipos de fundo nas frequências de 170 e 280 kHz. Assim, pode-se concluir que o backscatter multiespectral demonstrou maiores vantagens acerca de discriminação do fundo para substrato lamoso e de areia fina do que em fundos de sedimentos mais grossos.

REFERÊNCIAS

- Ankerst, M., Breunig, M. M., Kriegel, H.-P., & Sander, J. (1999). OPTICS: Ordering points to identify the clustering structure. *ACM SIGMOD Record*, 28(2), 49–60. <https://doi.org/10.1145/304181.304187>
- Applied Physics Laboratory - APL (1994). University of Washington. APL-UW High-Frequency Ocean Environmental Acoustic Models Handbook; Technical Report APL-UW TR9407; Applied Physics Laboratory, University of Washington: Seattle, WA, USA.
- Bastos, A. C., Quaresma, V. S., Marangoni, M. B., D'Agostini, D. P., Bourguignon, S. N., Cetto, P. H., Silva, A. E., Amado Filho, G. M., Moura, R. L., & Collins, M. (2015). Shelf morphology as an indicator of sedimentary regimes: A synthesis from a mixed siliciclastic–carbonate shelf on the eastern Brazilian margin. *Journal of South American Earth Sciences*, 63, 125–136. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.07.003>
- Brooke, B. P., Nichol, S. L., Huang, Z., & Beaman, R. J. (2017). Palaeoshorelines on the Australian continental shelf: Morphology, sea-level relationship and applications to environmental management and archaeology. *Continental Shelf Research*, 134, 26–38. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2016.12.012>
- Brown, C., Beaudoin, J., Brissette, M., & Gazzola, V. (2019). Multispectral Multibeam Echo Sounder Backscatter as a Tool for Improved Seafloor Characterization. *Geosciences*, 9(3), 126. <https://doi.org/10.3390/geosciences9030126>
- Brown, C. J., Smith, S. J., Lawton, P., & Anderson, J. T. (2011). Benthic habitat mapping: A review of progress towards improved understanding of the spatial ecology of the seafloor using acoustic techniques. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 92(3), 502–520. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.02.007>
- Buscombe, D., & Grams, P. (2018). Probabilistic Substrate Classification with Multispectral Acoustic Backscatter: A Comparison of Discriminative and Generative Models. *Geosciences*, 8(11), 395. <https://doi.org/10.3390/geosciences8110395>
- Campello, R. J. G. B., Moulavi, D., & Sander, J. (2013). Density-Based Clustering Based on Hierarchical Density Estimates. In J. Pei, V. S. Tseng, L. Cao, H. Motoda, & G. Xu (Orgs.), *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining* (Vol. 7819, p. 160–172). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37456-2_14
- Che Hasan, R., Ierodiaconou, D., & Laurenson, L. (2012). Combining angular response classification and backscatter imagery segmentation for benthic biological habitat mapping. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 97, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.10.004>
- Che Hasan, R., Ierodiaconou, D., Laurenson, L., & Schimel, A. (2014). Integrating Multibeam Backscatter Angular Response, Mosaic and Bathymetry Data for Benthic Habitat Mapping. *PLoS ONE*, 9(5), e97339. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097339>
- Cogan, C. B., Todd, B. J., Lawton, P., & Noji, T. T. (2009). The role of marine habitat mapping in ecosystem-based management. *ICES Journal of Marine Science*, 66(9), 2033–2042. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsp214>
- Comaniciu, D., & Meer, P. (2002). Mean shift: A robust approach toward feature space analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24(5), 603–619. <https://doi.org/10.1109/34.1000236>
- Costa, B. (2019). Multispectral Acoustic Backscatter: How Useful Is it for Marine Habitat Mapping and Management? *Journal of Coastal Research*, 35(5), 1062. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-18-00103.1>
- Diesing, M., Mitchell, P. J., O’Keeffe, E., Gavazzi, G. O. A. M., & Bas, T. L. (2020). Limitations of Predicting Substrate Classes on a Sedimentary Complex but Morphologically Simple Seabed. *Remote Sensing*, 12(20), 3398. <https://doi.org/10.3390/rs12203398>
- Diesing, M., Mitchell, P., & Stephens, D. (2016). Image-based seabed classification: What can we learn from terrestrial remote sensing? *ICES Journal of Marine Science: Journal Du Conseil*, 73(10), 2425–2441. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsw118>
- Dominguez, J.M.L. (2006). The Coastal Zone of Brazil: An Overview. *Journal of Coastal Research*, 16–20. <http://www.jstor.org/stable/25741527>
- Ester, M., Kriegel, H., Sander, J., Xu, X. (1996). A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise. Institute for Computer Science, University of Munich. *Proceedings of 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96)*, 226–231. <https://dl.acm.org/doi/10.5555/3001460.3001507>

- Feldens, P., Schulze, I., Papenmeier, S., Schönke, M., & Schneider von Deimling, J. (2018). Improved Interpretation of Marine Sedimentary Environments Using Multi-Frequency Multibeam Backscatter Data. *Geosciences*, 8(6), 214. <https://doi.org/10.3390/geosciences8060214>
- Fezzani, R., & Berger, L. (2018). Analysis of calibrated seafloor backscatter for habitat classification methodology and case study of 158 spots in the Bay of Biscay and Celtic Sea. *Marine Geophysical Research*, 39(1–2), 169–181. <https://doi.org/10.1007/s11001-018-9342-y>
- Fonseca, L., Brown, C., Calder, B., Mayer, L., & Rzhhanov, Y. (2009). Angular range analysis of acoustic themes from Stanton Banks Ireland: A link between visual interpretation and multibeam echosounder angular signatures. *Applied Acoustics*, 70(10), 1298–1304. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2008.09.008>
- Fonseca, L., & Mayer, L. (2007). Remote estimation of surficial seafloor properties through the application Angular Range Analysis to multibeam sonar data. *Marine Geophysical Researches*, 28(2), 119–126. <https://doi.org/10.1007/s11001-007-9019-4>
- Gaida, T., Tengku Ali, T., Snellen, M., Amiri-Simkooei, A., van Dijk, T., & Simons, D. (2018). A Multispectral Bayesian Classification Method for Increased Acoustic Discrimination of Seabed Sediments Using Multi-Frequency Multibeam Backscatter Data. *Geosciences*, 8(12), 455. <https://doi.org/10.3390/geosciences8120455>
- Hahsler, M., Piekenbrock, M., & Doran, D. (2019). dbscan: Fast Density-Based Clustering with R. *Journal of Statistical Software*, 91(1). <https://doi.org/10.18637/jss.v091.i01>
- Hahsler, M., and Piekenbrock, P. (2021). Dbscan: Density Based Clustering of Applications with Noise (DBSCAN) and Related Algorithms.
- Haralick, R.M., Shanmugam, K., Dinstein, I.H. (1973). Textural features for image classification. *Syst. Man. Cybern. IEEE Trans.* 6, 610e621.
- Harris, P. T., & Baker, E. (2020). Seafloor geomorphology as benthic habitat: GeoHAB atlas of seafloor geomorphic features and benthic habitats (2nd ed). Elsevier.
- Heap, A. D., Nichol, S. L., & Brooke, B. P. (2014). Seabed mapping to support geological storage of carbon dioxide in offshore Australia. *Continental Shelf Research*, 33, 108–115. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.02.008>
- Hughes Clarke, J.E. (2015). Multispectral Acoustic Backscatter from Multibeam, Improved Classification Potential. U.S. Hydrographic Conference, 19.
- Ierodionou, D., Schimel, A. C. G., Kennedy, D., Monk, J., Gaylard, G., Young, M., Diesing, M., & Rattray, A. (2018). Combining pixel and object based image analysis of ultra-high resolution multibeam bathymetry and backscatter for habitat mapping in shallow marine waters. *Marine Geophysical Research*, 39(1–2), 271–288. <https://doi.org/10.1007/s11001-017-9338-z>
- Innangi, S., Barra, M., Di Martino, G., Parnum, I. M., Tonielli, R., & Mazzola, S. (2015). Reson SeaBat 8125 backscatter data as a tool for seabed characterization (Central Mediterranean, Southern Italy): Results from different processing approaches. *Applied Acoustics*, 87, 109–122. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.06.014>
- Jackson, D. R., & Briggs, K. B. (1992). High-frequency bottom backscattering: Roughness versus sediment volume scattering. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 92(2), 962–977. <https://doi.org/10.1121/1.403966>
- Jackson, D.R.; Richardson, M.D. (2007). High-frequency Seafloor Acoustics, Monograph Series in Seafloor Acoustics. Springer, p. 616.
- Kirkman, S. P., Holness, S., Harris, L. R., Sink, K. J., Lombard, A. T., Kainge, P., Majiedt, P., Nsiangango, S. E., Nsingi, K. K., & Samaai, T. (2019). Using Systematic Conservation Planning to support Marine Spatial Planning and achieve marine protection targets in the transboundary Benguela Ecosystem. *Ocean & Coastal Management*, 168, 117–129. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.10.038>
- Kriegel, H., Kröger, P., Sander, J., & Zimek, A. (2011). Density-based clustering. *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*, 1(3), 231–240. <https://doi.org/10.1002/widm.30>
- Lamarque, G., & Lurton, X. (2018). Recommendations for improved and coherent acquisition and processing of backscatter data from seafloor-mapping sonars. *Marine Geophysical Research*, 39(1–2), 5–22. <https://doi.org/10.1007/s11001-017-9315-6>
- le Bas, T. P. (2016). RSOBIA - A new OBIA Toolbar and Toolbox in ArcMap 10.x for Segmentation and Classification. *GEOBIA 2016 : Solutions and Synergies*. GEOBIA 2016 : Solutions and Synergies, University of Twente Faculty of Geo-Information and Earth Observation (ITC). <https://doi.org/10.3990/2.448>

- Le Quilleuc, A., Collin, A., Jasinski, M. F., & Devillers, R. (2021). Very High-Resolution Satellite-Derived Bathymetry and Habitat Mapping Using Pleiades-1 and ICESat-2. *Remote Sensing*, 14(1), 133. <https://doi.org/10.3390/rs14010133>
- Lecours, V., Dolan, M. F. J., Micallef, A., & Lucieer, V. L. (2016). A review of marine geomorphometry, the quantitative study of the seafloor. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(8), 3207–3244. <https://doi.org/10.5194/hess-20-3207-2016>
- Lee, S. T. M., Kelly, M., Langlois, T. J., & Costello, M. J. (2015). Baseline seabed habitat and biotope mapping for a proposed marine reserve. *PeerJ*, 3, e1446. <https://doi.org/10.7717/peerj.1446>
- Lu, D., & Weng, Q. (2007). A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing*, 28(5), 823–870. <https://doi.org/10.1080/01431160600746456>
- Lucatelli, D., Goes, E. R., Brown, C. J., Souza-Filho, J. F., Guedes-Silva, E., & Araújo, T. C. M. (2019). Geodiversity as an indicator to benthic habitat distribution: An integrative approach in a tropical continental shelf. *Geo-Marine Letters*. <https://doi.org/10.1007/s00367-019-00614-x>
- Lucieer, V., Roche, M., Degrendele, K., Malik, M., Dolan, M., & Lamarche, G. (2018). User expectations for multibeam echo sounders backscatter strength data-looking back into the future. *Marine Geophysical Research*, 39(1–2), 23–40. <https://doi.org/10.1007/s11001-017-9316-5>
- Lurton, X., Eleftherakis, D., & Augustin, J.-M. (2018). Analysis of seafloor backscatter strength dependence on the survey azimuth using multibeam echosounder data. *Marine Geophysical Research*, 39(1–2), 183–203. <https://doi.org/10.1007/s11001-017-9318-3>
- Lurton, X., & Lamarche, G. (2015). Backscatter measurements by seafloor-mapping sonars. Guidelines and Recommendations. <http://geohab.org/wp-content/uploads/2014/05/BSWG-REPORT-MAY2015.pdf>
- Malik, M., Schimel, A. C. G., Masetti, G., Roche, M., Le Deunf, J., Dolan, M. F. J., Beaudoin, J., Augustin, J.-M., Hamilton, T., & Parnum, I. (2019). Results from the First Phase of the Seafloor Backscatter Processing Software Inter-Comparison Project. *Geosciences*, 9(12), 516. <https://doi.org/10.3390/geosciences9120516>
- Masetti, G., Mayer, L., & Ward, L. (2018). A Bathymetry- and Reflectivity-Based Approach for Seafloor Segmentation. *Geosciences*, 8(1), 14. <https://doi.org/10.3390/geosciences8010014>
- McGonigle, C., & Collier, J. S. (2014). Interlinking backscatter, grain size and benthic community structure. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 147, 123–136. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.05.025>
- Menandro, P., & Bastos, A. (2020). Seabed Mapping: A Brief History from Meaningful Words. *Geosciences*, 10(7), 273. <https://doi.org/10.3390/geosciences10070273>
- Monteale-Gavazzi, G., Roche, M., Lurton, X., Degrendele, K., Terseleer, N., & Van Lancker, V. (2018). Seafloor change detection using multibeam echosounder backscatter: Case study on the Belgian part of the North Sea. *Marine Geophysical Research*, 39(1–2), 229–247. <https://doi.org/10.1007/s11001-017-9323-6>
- Mosca, F., Matte, G., Lerda, O., Naud, F., Charlot, D., Rioblanc, M., & Corbières, C. (2016). Scientific potential of a new 3D multibeam echosounder in fisheries and ecosystem research. *Fisheries Research*, 178, 130–141. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2015.10.017>
- Parnum, I. M., & Gavrillov, A. N. (2011). High-frequency multibeam echo-sounder measurements of seafloor backscatter in shallow water: Part 2 – Mosaic production, analysis and classification. *Underwater Technology*, 30(1), 13–26. <https://doi.org/10.3723/ut.30.013>
- Picard, K., Brooke, B. P., Harris, P. T., Siwabessy, P. J. W., Coffin, M. F., Tran, M., Spinoccia, M., Weales, J., Macmillan-Lawler, M., & Sullivan, J. (2018). Malaysia Airlines flight MH370 search data reveal geomorphology and seafloor processes in the remote southeast Indian Ocean. *Marine Geology*, 395, 301–319. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2017.10.014>
- Quaresma, V. da S., Catabriga, G., Bourguignon, S. N., Godinho, E., & Bastos, A. C. (2015). Modern sedimentary processes along the Doce river adjacent continental shelf. *Brazilian Journal of Geology*, 45(4), 635–644. <https://doi.org/10.1590/2317-488920150030274>
- Quaresma, V. S., Bastos, A. C., Leite, M. D., Costa, A., Cagnin, R. C., Grilo, C. F., Zogheib, L. F., & Santos Oliveira, K. S. (2020). The effects of a tailing dam failure on the sedimentation of the eastern Brazilian inner shelf. *Continental Shelf Research*, 205, 104172. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2020.104172>

- Rocha, G. A., Bastos, A. C., Amado-Filho, G. M., Boni, G. C., Moura, R. L., & Oliveira, N. (2020). Heterogeneity of rhodolith beds expressed in backscatter data. *Marine Geology*, 423, 106136. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2020.106136>
- Runya, R. M., McGonigle, C., Quinn, R., Howe, J., Collier, J., Fox, C., Dooley, J., O'Loughlin, R., Calvert, J., Scott, L., Abernethy, C., & Evans, W. (2021). Examining the Links between Multi-Frequency Multibeam Backscatter Data and Sediment Grain Size. *Remote Sensing*, 13(8), 1539. <https://doi.org/10.3390/rs13081539>
- Rzhanov, Y., Fonseca, L., & Mayer, L. (2012). Construction of seafloor thematic maps from multibeam acoustic backscatter angular response data. *Computers & Geosciences*, 41, 181–187. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.09.001>
- Samsudin, S. A., & Hasan, R. C. (2017). ASSESSMENT OF MULTIBEAM BACKSCATTER TEXTURE ANALYSIS FOR SEAFLOOR SEDIMENT CLASSIFICATION. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4/W5, 177–183. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W5-177-2017>
- Schimel, A. C. G., Beaudoin, J., Parnum, I. M., Le Bas, T., Schmidt, V., Keith, G., & Ierodiaconou, D. (2018). Multibeam sonar backscatter data processing. *Marine Geophysical Research*, 39(1–2), 121–137. <https://doi.org/10.1007/s11001-018-9341-z>
- Sen, A., Ondréas, H., Gaillot, A., Marcon, Y., Augustin, J.-M., & Olu, K. (2016). The use of multibeam backscatter and bathymetry as a means of identifying faunal assemblages in a deep-sea cold seep. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 110, 33–49. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2016.01.005>
- Stephens, D., & Diesing, M. (2014). A Comparison of Supervised Classification Methods for the Prediction of Substrate Type Using Multibeam Acoustic and Legacy Grain-Size Data. *PLoS ONE*, 9(4), e93950. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0093950>
- Stewart, H. A., & Jamieson, A. J. (2019). The five deeps: The location and depth of the deepest place in each of the world's oceans. *Earth-Science Reviews*, 197, 102896. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102896>
- Tamsett, D., McIlvenny, J., & Watts, A. (2016). Colour Sonar: Multi-Frequency Sidescan Sonar Images of the Seabed in the Inner Sound of the Pentland Firth, Scotland. *Journal of Marine Science and Engineering*, 4(1), 26. <https://doi.org/10.3390/jmse4010026>
- Trzcinska, K., Janowski, L., Nowak, J., Rucinska-Zjadacz, M., Kruss, A., von Deimling, J. S., Pocwiardowski, P., & Tegowski, J. (2020). Spectral features of dual-frequency multibeam echosounder data for benthic habitat mapping. *Marine Geology*, 427, 106239. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2020.106239>
- Trzcinska, K., Tegowski, J., Pocwiardowski, P., Janowski, L., Zdroik, J., Kruss, A., Rucinska, M., Lubniewski, Z., & Schneider von Deimling, J. (2021). Measurement of Seafloor Acoustic Backscatter Angular Dependence at 150 kHz Using a Multibeam Echosounder. *Remote Sensing*, 13(23), 4771. <https://doi.org/10.3390/rs13234771>
- Vieira, F. V., Bastos, A. C., Quaresma, V. S., Leite, M. D., Costa, A., Oliveira, K. S. S., Dalvi, C. F., Bahia, R. G., Holz, V. L., Moura, R. L., & Amado Filho, G. M. (2019). Along-shelf changes in mixed carbonate-siliciclastic sedimentation patterns. *Continental Shelf Research*, 187, 103964. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.103964>
- Walbridge, S., Slocum, N., Pobuda, M., & Wright, D. (2018). Unified Geomorphological Analysis Workflows with Benthic Terrain Modeler. *Geosciences*, 8(3), 94. <https://doi.org/10.3390/geosciences8030094>
- Williams, K. L., Jackson, D. R., Dajun Tang, Briggs, K. B., & Thorsos, E. I. (2009). Acoustic Backscattering From a Sand and a Sand/Mud Environment: Experiments and Data/Model Comparisons. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 34(4), 388–398. <https://doi.org/10.1109/JOE.2009.2018335>

CAPÍTULO 4

Resposta do backscatter multiespectral em fundos heterogêneos cobertos por rodolitos

O capítulo 4 resultou em publicação de artigo:

- ✓ Menandro PS, Misiuk B., Brown CJ, Bastos AC. 2023. Multispectral multibeam backscatter response of heterogenous rhodolith beds. *Scientific Reports*. 2023

www.nature.com/scientificreports

scientific reports

 Check for updates

OPEN **Multispectral multibeam backscatter response of heterogeneous rhodolith beds**

Pedro S. Menandro¹, Benjamin Misiuk², Craig J. Brown² & Alex C. Bastos^{1,2}

Acoustic backscatter has been used as a tool to map the seafloor in greater detail and plays an increasingly important role in seafloor mapping to meet multiple ocean management needs. An outstanding challenge to the use of backscatter for seafloor mapping is the distinction between acoustically similar substrates, such as mixed sediments from rhodoliths. Rhodolith beds are a biogenic substrate that provides important ecological services, and are typically classified as a single categorical substrate type—though nodules coverage may be spatially variable. Recently, multispectral acoustic backscatter has demonstrated great potential to improve thematic seafloor mapping compared to single-frequency systems. This work employs multispectral multibeam backscatter and underwater imagery to characterize and map rhodolith beds in the Costa das Algas Marine Protected Area (Brazil). A support vector machine classifier was used to classify multifrequency backscatter mosaics according to rhodolith classes identified from underwater imagery. Results suggest that multispectral backscatter is effective both in providing information for mapping different proportions of rhodolith coverage and in predicting the presence or absence of these nodules. The backscatter of the lowest frequency was the most useful for distinguishing variable proportions of rhodolith coverage, and the two higher frequencies were better predictors of presence and absence.

Resposta do backscatter multiespectral em fundos heterogêneos cobertos por rodolitos

Resumo: O backscatter acústico tem sido usado como ferramenta para mapear o substrato marinho com maior detalhamento e vem desempenhando uma posição cada vez mais importante na classificação e mapeamento do fundo para atender a múltiplas necessidades relacionadas a gestão e planejamento marinhos. Um dos pontos que ainda demanda atenção e desenvolvimento é o aprimoramento da diferenciação de fundos acusticamente similares, como por exemplo substratos mistos (areia, cascalhos, fragmentos) de fundos de rodolitos. Fundos de rodolito são substratos biogênicos que fornecem importantes serviços ecológicos, e são tipicamente classificados como uma única categoria ou tipo de fundo, ainda que a cobertura de nódulos seja espacialmente variável. Nos últimos anos, o backscatter multiespectral vem demonstrando grande potencial para melhorar a classificação temática do fundo marinho em comparação a sistemas convencionais de uma única frequência. Esse capítulo utiliza dados de backscatter multiespectral e imagens do fundo marinho para caracterizar e mapear fundos de rodolitos na APA Costa das Algas (Espírito Santo – Brasil). A classificação baseada no algoritmo Support Vector Machine foi aplicada com base nos mosaicos das múltiplas frequências e de acordo com as classes estabelecidas a partir das imagens coletadas. Os resultados sugerem que o backscatter multiespectral é adequado e eficiente tanto para prover informações acerca das diferentes proporções de cobertura de rodolitos sobre o fundo, como para fornecer informações suficientes para modelar a presença ou ausência dos nódulos. O backscatter da frequência mais baixa foi o mais efetivo para distinguir os diferentes percentuais de cobertura de rodolitos, e as duas frequências mais altas obtiveram melhor proficiência na predição de presença ou ausência dos nódulos.

1. INTRODUÇÃO

O backscatter de multifeixe vem assumindo um papel cada vez mais importante e vem sendo crescentemente utilizado como proxy para mapeamento do tipo de substrato (Diesing et al, 2020, Trzcinska et al, 2020) e aprimorando modelos de classificação de habitats (Brown and Blondel, 2009; Ierodiconou et al, 2018). Compreensão detalhada de habitats marinhos é uma demanda para alcançar múltiplas necessidades no gerenciamento de recursos marinhos e oceânicos, e o backscatter vem contribuindo para refinar a caracterização do fundo e modelos de classificação, já sendo aplicados como objeto de pesquisas que envolvem por exemplo mudanças sazonais da comunidade bentônica (Schulze et al, 2022), modelagem preditiva de estoques de carbono (Hunt et al, 2021), mapeamento de gramas marinhas (Rende et al, 2020), mapeamento de rodolitos (Rocha et al, 2020), e distribuição da abundância de nódulos de manganês (Kuhn and Rühlemann, 2020).

Embora os avanços tecnológicos e metodológicos venham alcançando um alto nível de detalhamento e acurácia na classificação do fundo marinho, ainda existem algumas lacunas de conhecimento a serem investigadas. Um dos desafios está relacionado à dificuldade que ainda persiste na distinção de fundos acusticamente similares (Lucieer et al, 2013), como já reportado no caso de fundos com *P. oceânica* e areias cascalhosas (De Falco et al, 2010), fundos mistos e rodolitos (Parnum and Gavrilov, 2011), sedimento grosso e sedimento misto (Diesing et al, 2020).

Dentre esses tipos de fundo semelhantes em termos acústicos, vale ressaltar a importância dos rodolitos, que são nódulos de vida livre compostos geralmente em sua maioria por algas calcárias não-articuladas (Bosence, 1983; Foster, 2013). Fundos de rodolitos podem cobrir extensas áreas que fornecem vários serviços ecossistêmicos (Nelson, 2009; Basso et al, 2016), tais como substrato e habitat para fauna e flora (Foster, 2001), e a formação de uma estrutura tridimensional que abriga vários processos de recrutamento, além de serem considerados uma bio-fábrica de CaCO_3 (Amado-Filho et al, 2012). Além disso, vale ressaltar que fundos de rodolitos podem ser heterogêneos considerando a estrutura, tamanho e concentração dos nódulos (Horta et al, 2016). Essa variação possui uma relevância ecológica que também deveria ser considerada visto que fundos de rodolitos são tipicamente classificados em uma única categoria, isto é, presença ou ausência, ainda que a cobertura dos nódulos seja variável espacialmente. Embora esses nódulos apresentem-se distribuídos globalmente, a pesquisa científica envolvendo rodolitos é relativamente limitada se comparada com outros habitats costeiros vegetais (Rendina et al, 2022). Quando consideramos estudos que envolvam mapeamento acústico e backscatter dos rodolitos, esse catálogo torna-se ainda mais restrito.

Neste cenário, um dos recentes avanços que tem grande potencial para incrementar a diferenciação do fundo marinho e uma caracterização mais detalhada de fundos de rodolito é o backscatter multiespectral. Apesar da ainda modesta literatura científica nesse tópico de pesquisa, algumas vantagens em termos de diferenciação do fundo marinho com a aplicação do método multifrequência em outros tipos de fundo já conseguiram ser demonstradas (Fakiris et al, 2019; Runya et al, 2021; Menandro et al, 2022).

Em geral, várias técnicas podem ser usadas para investigar dados de backscatter, incluindo o uso de variáveis derivadas da análise baseada na imagem (mosaicos e variáveis texturais), e da análise da variação angular (ARA) na qual os valores de backscatter conforme ângulo de incidência são preservados ao custo da resolução e representação espacial. A grande quantidade de informações oriundas dessas diferentes análises pode ser efetivamente implementada e analisada utilizando várias ferramentas de classificação (Diesing et al, 2016; Wicaksono et al, 2019) baseadas em *machine-learning*, dentre as quais são comumente aplicadas *Artificial Neural Networks* (Marsh & Brown, 2009; Misiuk and Brown, 2022), *Support Vector Machine – SVM* (Stephens & Diesing, 2014; Cui et al, 2021) e *Random Forest* (Porskamp et al, 2018). SVM é considerada bem adequada para input de dados no formato *raster* (como por exemplos mosaicos de banda única ou compostas) e vem demonstrando boas performances na análise de imagens de sensoriamento remoto (Mountrakis et al, 2011; Eugenio et al, 2015; Zhang et al, 2015). Além disso, SVM possui vantagens sobre outros métodos de classificação devido a habilidade de boa generalização mesmo com número limitado de amostras para treinamento, desbalanço de amostras, distribuições não-lineares e variáveis de grandes dimensões (Cui et al, 2021; Mountrakis et al, 2011).

Assim, neste capítulo utiliza um mosaico de banda composta (três bandas, uma representando cada frequência) como input para uma classificação SVM, buscando detalhar a resposta acústica do rodolitos pela primeira vez utilizando dados de backscatter multifrequência. Imagens do fundo marinho foram utilizadas para designar 4 classes, as quais serviram de base para detalhar e compreender a variação e importância de diferentes frequências do backscatter. Os objetivos estabelecidos foram: i) explorar os benefícios do backscatter multiespectral quando comparados a frequência única através de técnicas de classificação supervisionada – SVM - ii) analisar as diferenças entre os dados de backscatter de 3

frequências (170 kHz, 280 kHz e 400 kHz) em relação a cobertura de rodolitos; iii) gerar um mapa de rodolitos da área de estudo.

2. METODOLOGIA

Esse capítulo desenvolveu as análises com base em um conjunto de dados que consiste em batimetria, backscatter multiespectral e imagens subaquáticas do fundo marinho coletadas por dropcameras na porção offshore da APA Costa das Algas (localizada no Espírito Santo, Brasil). Essa região já é conhecida pela geodiversidade, heterogeneidade morfológica, com vales incisos e ocorrência marcante de fundos de rodolitos (Vieira et al, 2019; Menandro et al, 2022; Oliveira et al, 2023).

O estudo foi conduzido em três polígonos específicos indicados na Figura 4-1. A seleção das áreas foi baseada na variabilidade do tipo de fundo (considerando a morfologia e o material do fundo), englobando desde regiões com sedimento mais fino, a cascalhoso e com rodolitos. Além disso, a disponibilidade de dados de verdade de campo também foi considerada para delimitar os polígonos. As profundidades variaram de 43 m a até mais de 200 m.

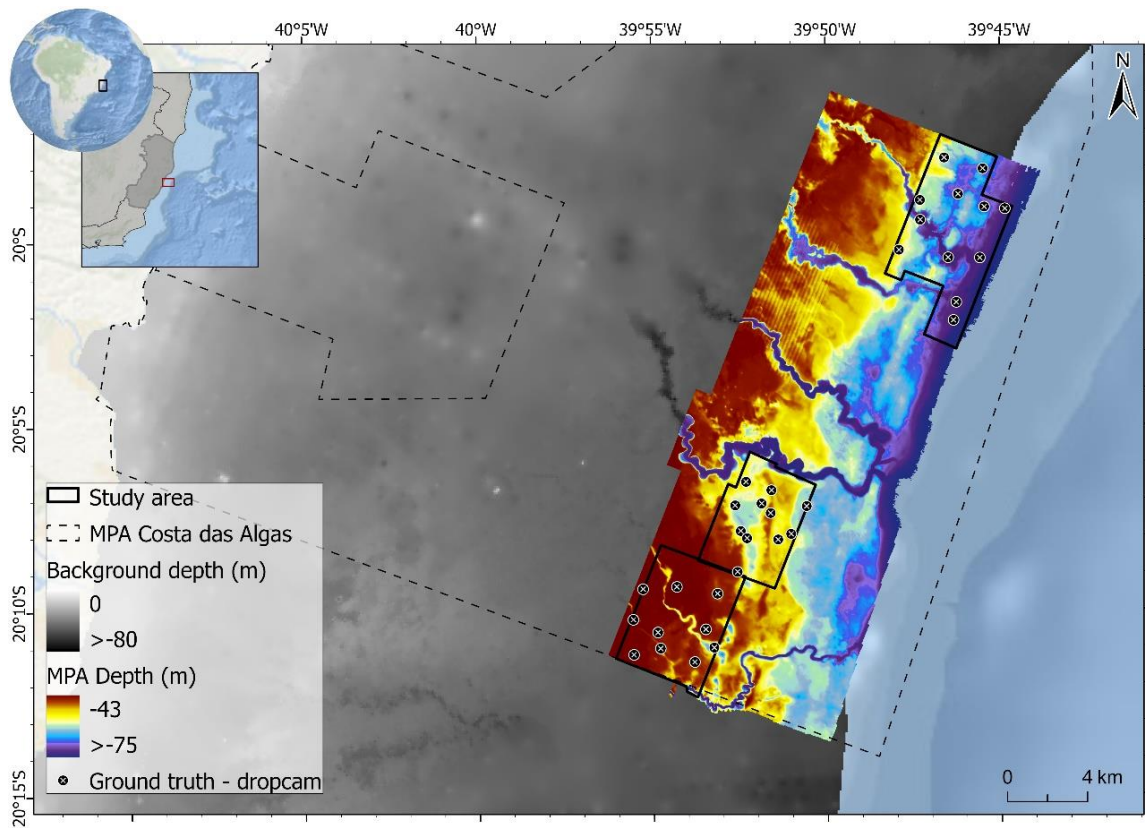


Figura 4-1: Mapa da área de estudo indicando os três polígonos onde foram conduzidas as análises.

O fluxo metodológico desse capítulo é baseado em três etapas principais: a) aquisição e processamento dos dados de backscatter; b) aquisição e processamento das imagens de dropcameras; c) classificação SVM utilizando os mosaicos das múltiplas frequências.

2.1. Aquisição e processamento dos dados

O conjunto de dados de batimetria e backscatter multifeixe multiespectral também foram coletados no âmbito do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática (PMBA) entre 2019 e 2020, então a descrição de aquisição e processamento será basicamente a mesma do capítulo 3.

O equipamento utilizado foi o MBES da fabricante R2 Sonic, modelo 2024, com a cabeça do sonar acoplada a um sistema conhecido como *moon pool*, que consiste em uma abertura no centro da embarcação onde é instalada a haste com o sistema (multifeixe, sistema inercial para correção de movimentos – IMU, e perfilador da velocidade superficial do som na água). A aquisição foi configurada para operar através de pings sequenciais em três frequências (170, 280, 400 kHz) no modo equiangular. A frequência de 700 kHz não foi habilitada durante o levantamento devido a profundidade da região ser um fator limitante, que é bem maior do que a trabalhada no capítulo 3. Parâmetros como “*Power*”, “*Pulse length*”, “*Gain*” e “*Spreading*” foram mantidos inalterados ao longo de todo o levantamento após testes e definição de uma configuração que fosse ideal para toda a área de sondagem. A abertura dos feixes ou setor angular de emissão foi estabelecida como 90° ao longo dos quais 256 beams se distribuíram.

O sistema operou de maneira integrada com o POS MV Wave Master Inertial Navigation System (INS), com correção diferencial de posicionamento. Importante ressaltar que durante a aquisição dos dados foram adquiridos perfis verticais com Valeport Mini (configurado para coletar velocidade do som, pressão, salinidade e temperatura ao longo da coluna d’água) a cada 3 horas com o propósito de corrigir efeitos de refração dos feixes, bem como calcular e aplicar os valores de coeficiente de “Absorption” e permitir a correção do backscatter de acordo com a frequência. A aplicação dos coeficientes de “Absorption” para cada frequência foi a única correção radiométrica aplicada durante a aquisição dos dados, todas as outras são aplicadas no pós-processamento.

A aquisição foi realizada com o software QPS QINSy 8.18.3, com análise de qualidade dos dados batimétricos durante o levantamento realizada no software Caris HIPS 11.2. Já o processamento dos dados batimétricos foi realizado em laboratório no software Qimera 2.0. Para o processamento e análise dos registros de backscatter foram utilizados o software da QPS Fledermaus Geocorder Toolbox Version 7.9.5 (FMGT).

Apesar de ainda persistir uma lacuna de conhecimento no que tange a padronização de processamento do backscatter, o fluxo aplicado nesse trabalho seguiu as recomendações descritas em Lamarche and Lurton (2018) e em Schimel et al (2018). As principais etapas envolvem a filtragem de frequência, correção dos parâmetros de aquisição, a opcional correção AVG (Angular Varying Gain - filtro para compensação do efeito angular). Após essas etapas fundamentais do processamento, os dados foram exportados na forma de mosaico de backscatter (com resolução de 0.5 metro) para cada frequência e posteriormente combinados em um mosaico multibanda (imagem de banda composta RGB). Todos os mosaicos serviram como input para o modelo de classificação empregado. Além disso, curvas de resposta angular foram extraídas utilizando o FMGT para geração de informações descritivas extras a fim de facilitar as comparações relativas entre as frequências nas diferentes classes estabelecidas.

2.2. Aquisição e processamento dos dados de verdade de campo

Imagens subaquáticas do fundo marinho em 33 estações foram usadas como verdade de campo. As imagens foram coletadas com um sistema conhecido como dropcamera, que consiste basicamente em uma estrutura de aço inox na qual são acopladas 2 câmeras gopro (GoPro Hero 7) – uma com visão panorâmica e outra direcionada para o fundo, e lanternas. As localizações foram selecionadas buscando abranger a variação morfológica da região e a distribuição e variedades de habitats classificados em Menandro et al (2022).

As imagens com vista ortogonal (direcionadas para baixo, imageando o fundo em um quadrado de dimensões 60 cm x 60 cm) foram individualmente processadas utilizando o software/freeware ImageJ. As etapas envolvidas nesse processo são sumarizadas a seguir: i) melhorar a imagem a partir da edição dos padrões de brilho e contraste; ii) configurar a dimensão real para escalar a imagem; iii) delinear manualmente polígonos que definem a presença da cobertura de rodolitos no fundo; calcular a porcentagem da cobertura de rodolitos. Esses resultados da última etapa que estabeleceram uma referência para definir as classes e treinar o modelo classificatório.

Os intervalos de valores para determinar as classes em termos de porcentagem de cobertura dos rodolitos não são padronizados na literatura científica, sendo muitas vezes tratados como presença ou ausência. Em Matsuda & Iryu (2011), a classe referente a alta cobertura é categorizada como mais de 40%, enquanto a cobertura baixa é definida como menos de 30% de cobertura dos nódulos no fundo marinho; já em Rocha et al (2020), diferentes intervalos de cobertura foram considerados - cobertura baixa correspondendo a menos de 25%, uma classe moderada com cobertura entre 25% e 35%, e alta cobertura indicando mais de 35%. Neste trabalho, quatro classes foram definidas com base na porcentagem de cobertura dos rodolitos (ver secção 3.2), de modo a detalhar as classes de menor cobertura para melhor distinguir fundos mistos (por exemplo, diferenciar cascalhos /fragmentos carbonáticos de rodolitos esparsos), além de ter considerado também os valores propostos pelo método de quebras naturais de Jenks (14,16% e 29,16% ajustados para 15% e 35%, respectivamente). As classes finais foram: sem rodolitos, porcentagem de cobertura de rodolitos até 15%, porcentagem de cobertura de rodolitos entre 15% e 35%, e porcentagem de cobertura superior a 35%.

2.3. Classificação SVM (Support Vector Machine)

SVM é uma poderosa técnica de *machine-learning* utilizada para um amplo leque de aplicações, e vem sendo crescentemente empregada para classificação de imagem e mapeamento de habitat (Che Hasan et al, 2012; Eugenio et al, 2015; Wikaksono et al, 2019; Cui et al, 2021). Essa técnica não requer uma estimativa da distribuição estatística das classes para efetuar a classificação, e vem produzindo resultados de elevada precisão em termos de classificação a partir da separação de amostras com um hiperplano (que é basicamente a fronteira com margem máxima segregando classes distintas), mesmo quando se utiliza uma quantidade limitada de dados de treino. Para descrições mais detalhadas da fundamentação dos algoritmos SVM e dos conceitos do método, consultar Burges (1995), Huang et al (2010) e Mountrakis et al (2011).

O modelo SVM foi treinado (amostras de treinamento foram determinadas a partir das imagens de dropcamera categorizadas) e implementado no R (utilizando pacotes *terra* – Hijmans (2022), *e1071* – Meyer et al (2023), e *caret* – Kuhn (2008)) para gerar um mapa de classificação baseado nos mosaicos de

cada frequência separadamente e usando as três frequências combinadas (mosaico RGB). Embora no estudo apresentado tenham sido consideradas apenas as variáveis relacionadas ao backscatter, tentativas envolvendo outras variáveis morfométricas tais como profundidade e rugosidade foram previamente investigadas para verificar se melhorariam o modelo (dados apresentados como material suplementar em Menandro et al, 2023). Além de não terem melhorado o modelo, vale ressaltar que a profundidade não é o único fator regulador da cobertura e tamanho dos nódulos, e a relação entre essas variáveis é complexa e varia ao largo de diferentes plataformas (Horta et al, 2016).

Os mosaicos de backscatter foram inicialmente empilhados e convertidos em matrizes no R. A etapa que precede a classificação é o treinamento de amostras, que consiste na extração de valores em cada estação amostral para assim estabelecer a correspondência com cada classe definida pelas imagens. Como o barco não possuía sistema de posicionamento dinâmico nem foi ancorado durante as coletas das imagens, e o sistema de dropcameras não possuía posicionamento subaquático, uma incerteza de posicionamento das verdades de campo deve ser considerada. Considerando esses fatores e com o suporte das imagens panorâmicas, os valores de backscatter foram extraídos em um raio de 50 m ao redor de cada estação amostral. Para rodar o classificador SVM foram realizados testes nos parâmetros de custo e kernel; a configuração selecionada foi a de *kernel radial basis* e um valor do parâmetro *cost* = 3, sendo todos os outros parâmetros mantidos como padrão. A matriz de confusão e as métricas de acurácia (*overall accuracy*, *balanced accuracy*, *sensitivity* e *specificity*) foram calculadas para avaliação da classificação – procedimento conhecido como *leave-one-out cross-validation*. O resultado da classificação preditiva foi rasterizado e plotado no ArcGIS Pro.

3. RESULTADOS

3.1. Imagens do fundo marinho

A análise das imagens subaquáticas permitiu a identificação de quatro classes de acordo com a cobertura de rodolitos: Classe 1) Ausência de rodolitos; Classe 2) Menos de 15% de cobertura de rodolitos; Classe 3) Cobertura entre 15% e 35%; e Classe 4) Cobertura maior do que 35%. A Figura 4-2 apresenta o mapa com a distribuição das estações categorizadas, bem como alguns exemplos de imagens obtidas para cada classe.

No geral, a maioria das amostras classificadas como Classe 1 estão distribuídas na área Sul, enquanto a maior parte da Classe 2 encontra-se na área central. As Classes 3 e 4, com as maiores porcentagens de cobertura de rodolitos, aparecem dominando a área norte.

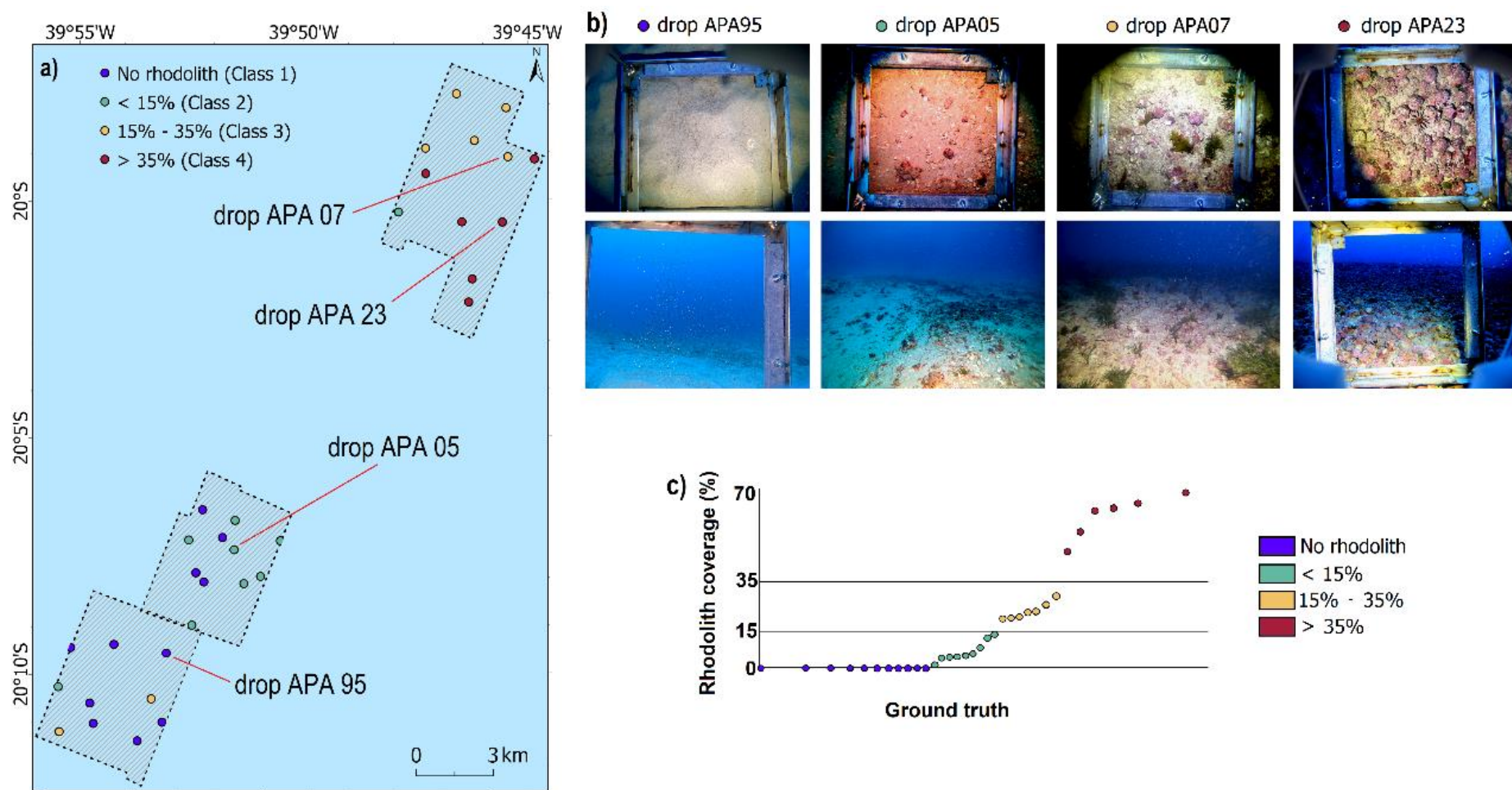


Figura 4-2: a) Mapa com as estações amostrais classificadas; b) exemplos de imagens obtidas em cada classe (nas quais as curvas de resposta angular foram extraídas – ver Figura 5 Seção 4.3.2); c) gráfico delimitando os intervalos de cobertura com os dados obtidos das verdades de campo.

3.2. Mapeamento do backscatter multiespectral

A Figura 4-3 apresenta os mosaicos (individuais para cada frequência e o RGB composto) para cada área (norte, central e sul). Visualmente, as áreas central e norte mostram uma maior intensidade de backscatter quando comparadas a área sul, o que também é indicado pelo mosaico multiespectral. O mosaico RGB foi especialmente útil para visualização de regiões onde as diferenças nos valores de backscatter das diferentes frequências são difíceis de detectar a olho nu nos mosaicos de frequência única.

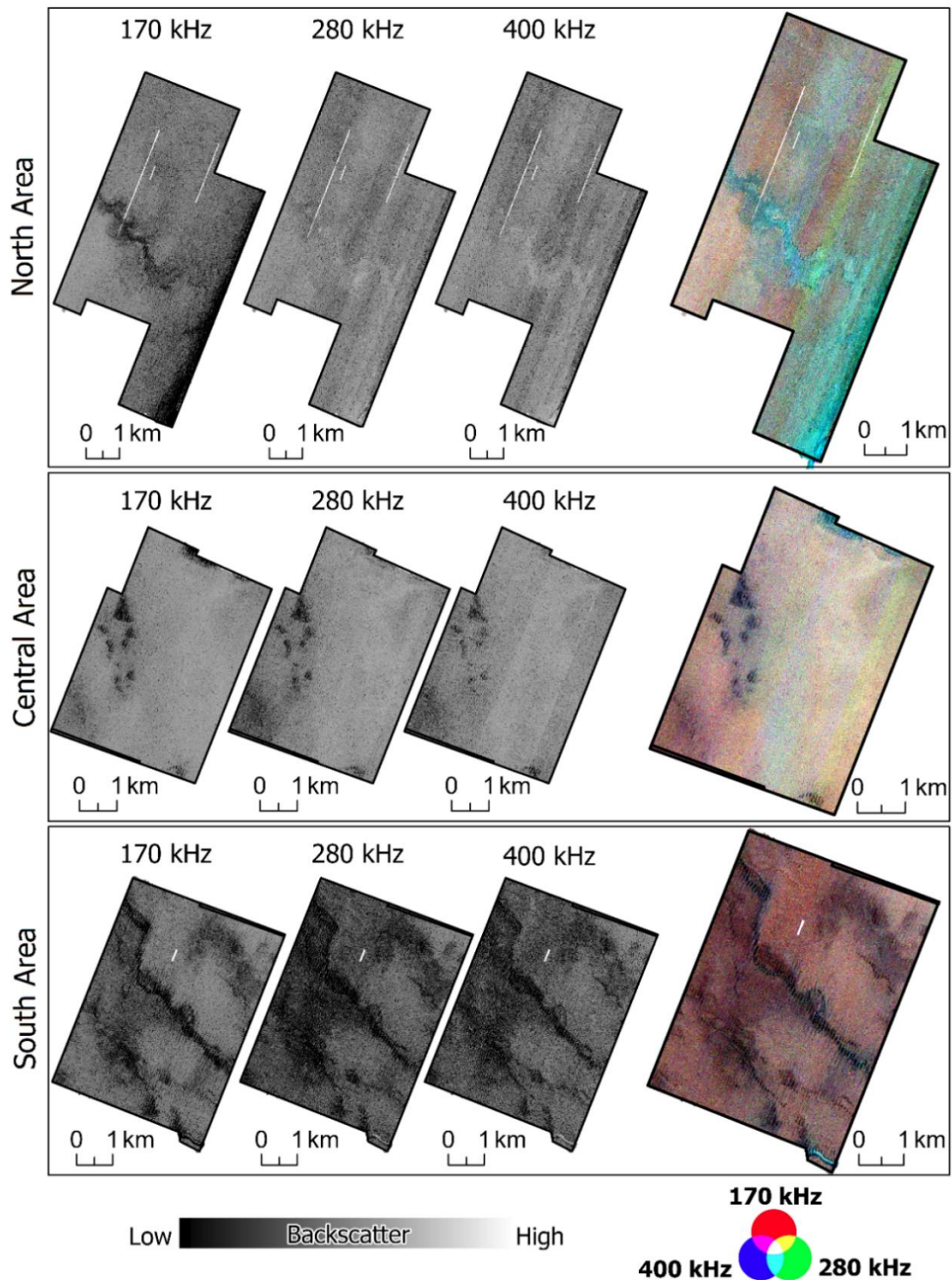


Figura 4-3: Mosaicos de backscatter (individuais para cada frequência e o RGB de banda composta) para cada área.

Diferenças no backscatter observados no fundo dos vales incisos (que podem ser identificados facilmente pela batimetria da Figura 4-1) do norte e do sul são notáveis – considerando a resposta individual das frequências e a diferença entre as frequências (perfis na Figura 4-4 contribuem para melhor visualização). Na área norte, as altas frequências registraram altos valores de backscatter, enquanto a baixa frequência (170 kHz) retornou valores mais baixos; já na região sul, todas as frequências mostraram baixos valores de backscatter no fundo do vale.

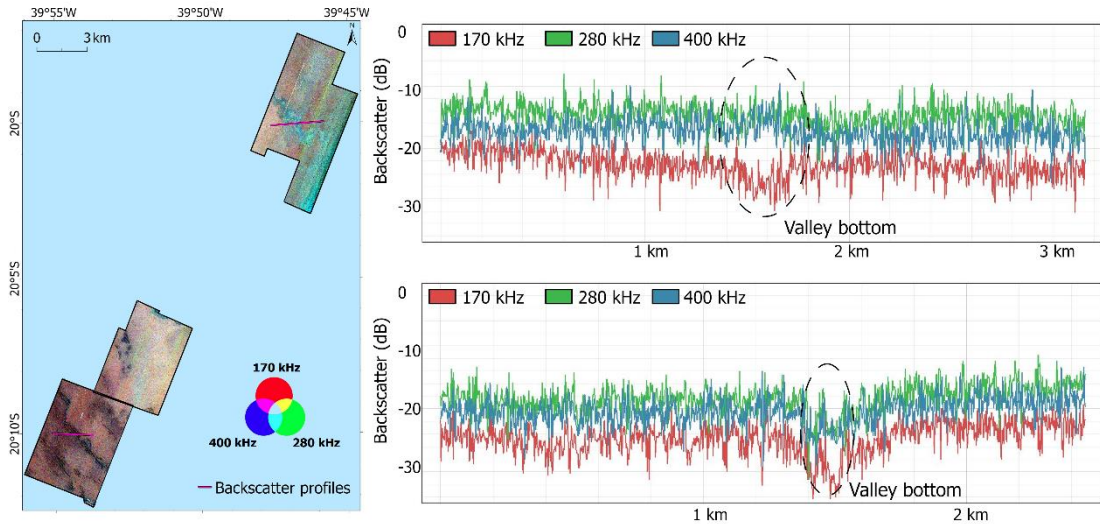


Figura 4-4: Perfis dos valores de backscatter cruzando dois diferentes vales evidenciando respostas acústicas distintas (ao norte, frequência mais baixa com comportamento distinto; ao sul, comportamento similar de todas as frequências).

Buscando fornecer informações descritivas extras para explorar o comportamento acústico e permitir a complementariedade entre as abordagens (baseada na imagem e ARA), curvas de resposta angular foram extraídas sobre quatro estações amostrais representativas das classes definidas (Figura 4-5). As imagens coletadas como verdade de campo nas respectivas estações correspondentes são as apresentadas na Figura 4-2.

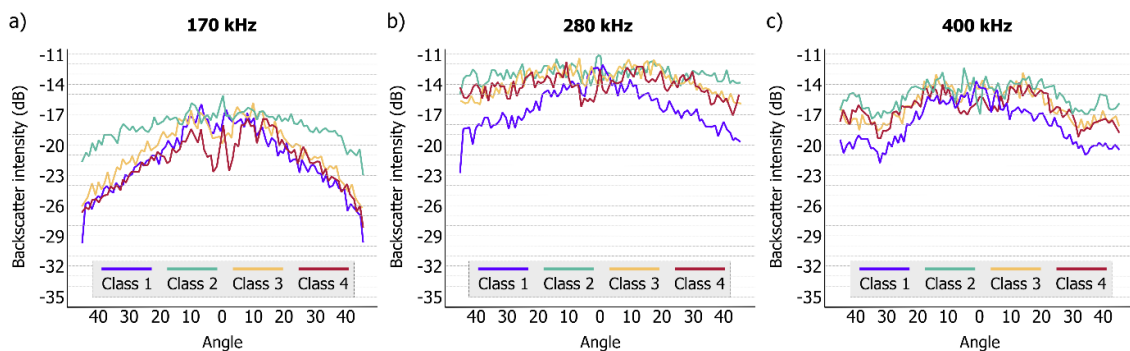


Figura 4-5: Curvas da resposta angular extraídas para cada frequência em estações representativas das quatro classes de fundo (Classe 1 – APA 95, Classe 2 – APA 05, Classe 3 – APA 07, Classe 4 – APA 23).

Para as altas frequências (Figura 4-5b e 4-5c), a maior perda ou decréscimo nos valores de backscatter conforme aumento do ângulo de incidência ocorreu na Classe 1 (ausência de rodolitos); nessa mesma classe, a perda de intensidade do backscatter nos ângulos mais externos do feixe também foi fortemente observada

para a frequência de 170 kHz. Para as classes com rodolito, as curvas mostraram formato mais plano e comportamentos similares nas frequências mais altas, com menor perda conforme variação angular, especialmente para a frequência de 280 kHz. Já na frequência de 170 kHz, o sinal de backscatter mostrou uma resposta distinta, com aumento da perda angular de acordo com o aumento da porcentagem de cobertura de rodolitos, ou seja, menor perda angular para a Classe 2 e maior perda angular para as Classes 3 e 4.

3.3. Classificação SVM

A classificação do fundo marinho utilizando SVM foi executada utilizando duas lógicas: quatro classes de acordo com a porcentagem de cobertura de rodolitos e presença ou ausência dos nódulos. Para alcançar tais resultados, os mosaicos de backscatter foram utilizados como input (individualmente e de forma combinada – banda composta RGB). A Figura 4-6 mostra as classificações geradas.

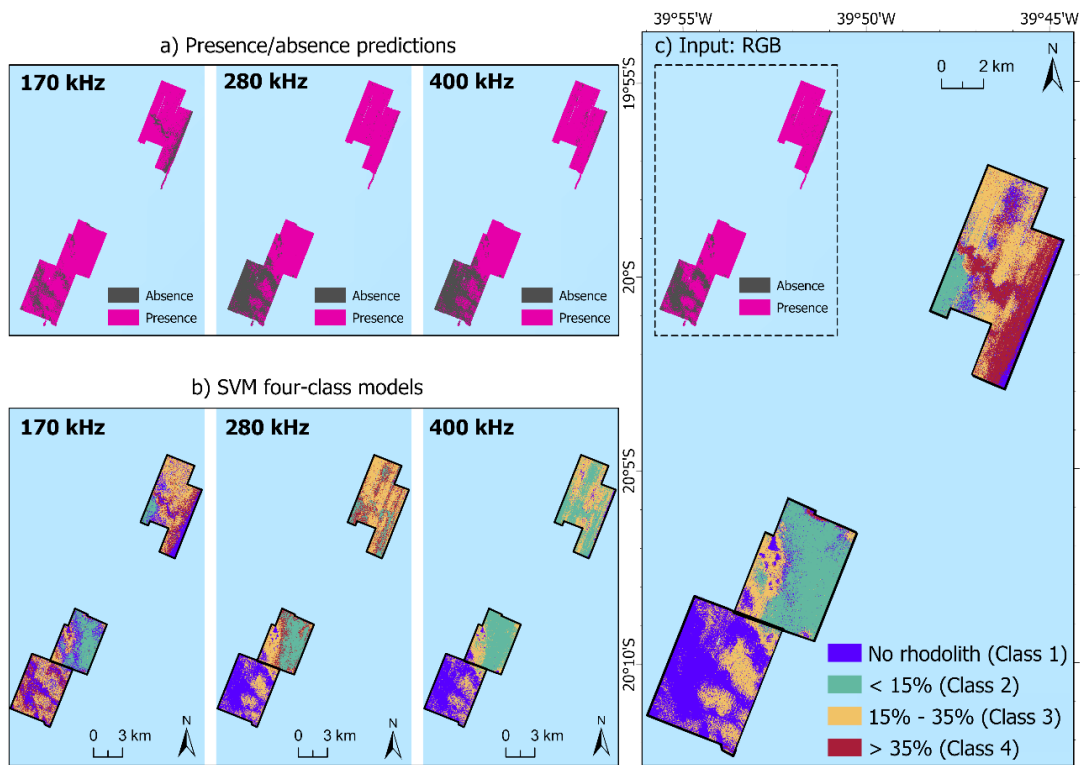


Figura 4-6: Modelos preditos a partir da classificação SVM treinados com base em: a) presença ou ausência de rodolitos; b) quatro classes de acordo com a cobertura de rodolitos no fundo marinho utilizando como input os mosaicos de cada frequência individualmente (monocromáticos); c) quatro classes utilizando como input o mosaico multiespectral RGB.

Os valores médios de backscatter de cada frequência foram extraídos para cada classe considerando o output gerado pelo modelo da Figura 6c (Tabela 1). Em geral, observa-se valores mais altos para todas as frequências na Classe 2, e a frequência de 170 kHz mostrou os menores valores para todas as classes. Vale ressaltar que os valores de desvio padrão (SD) para a Classe 1 foram os mais altos encontrados no espectro de frequências coletadas, o que era esperado visto que essa classe acabou abrangendo uma gama de tipos de fundo sem rodolitos.

Tabela 4-1: Valores médios de backscatter e desvio padrão (SD) extraídos de cada classe para cada frequência.

	Backscatter		
	170 kHz	280 kHz	400 kHz
<i>Class 1</i>	-24.30 dB (SD ± 3.56)	-17.30 dB (SD ± 3.11)	-19.44 dB (SD ± 3.17)
<i>Class 2</i>	-20.51 dB (SD ± 1.96)	-13.67 dB (SD ± 2.02)	-16.53 dB (SD ± 2.02)
<i>Class 3</i>	-22.69 dB (SD ± 1.82)	-15.75 dB (SD ± 1.98)	-18.21 dB (SD ± 1.94)
<i>Class 4</i>	-24.55 dB (SD ± 2.06)	-14.42 dB (SD ± 2.06)	-17.07 dB (SD ± 2.10)

O modelo de quatro classes baseado na frequência mais baixa (170 kHz) – Figura 4-6b – obteve a maior acurácia (Tabela 2) e resultou em um melhor poder de discriminação das diferentes classes de rodolitos na área norte quando comparado com os outros modelos de frequência única. Contudo, a Classe 1 (ausência de rodolitos) parece estar subestimada e aparece pouco no mapa desse modelo; ainda sobre os resultados da frequência mais baixa, mostraram a pior performance considerando a predição de presença ou ausência dos nódulos (Figura 4-6a e Tabela 2). Já os modelos com input das frequências de 280 e 400 kHz apresentaram distribuição das classes visualmente semelhantes e resultados estatísticos bem similares (Tabela 2), alcançando melhor performance quando utilizados para classificar a presença ou ausência de rodolitos (ver matrizes de confusão na Tabela 3). O modelo baseado na frequência de 400 kHz foi o menos adequado para diferenciação das classes de rodolitos, o que pode ser demonstrado pelos mais baixos valores de acurácia e a ausência da Classe 4 no mapa desse modelo.

Tabela 4-2: Métricas de acurácia extraídas dos resultados de cada modelo de classificação.

Esquema de classificação o para os modelos SVM	Accuracy assessment	170 kHz	280 kHz	400 kHz	Multispectral	
Presença/ Ausência	Accuracy	0.78	0.84	0.84	0.84	
	Balanced accuracy	0.70	0.80	0.80	0.77	
	Sensitivity	0.50	0.70	0.70	0.60	
	Specificity	0.90	0.90	0.90	0.95	
Porcentagem de cobertura de rodolitos (4 classes)	Accuracy	0.75	0.56	0.50	0.71	
	Balanced accuracy	0.76	0.52	0.46	0.73	
	Sensitivity	Class 1: 0.70	Class 1: 0.70	Class 1: 0.70	Class 1: 0.70	Class 1: 0.60
		Class 2: 0.66	Class 2: 0.55	Class 2: 0.44	Class 2: 0.66	Class 2: 0.66
		Class 3: 0.85	Class 3: 0.85	Class 3: 0.71	Class 3: 0.85	Class 3: 0.85
		Class 4: 0.83	Class 4: 0.0	Class 4: 0.0	Class 4: 0.83	Class 4: 0.83
Specificity	Class 1: 0.86	Class 1: 0.90	Class 1: 0.90	Class 1: 0.86	Class 1: 0.86	
	Class 2: 1.0	Class 2: 0.82	Class 2: 0.60	Class 2: 0.91	Class 2: 0.91	
	Class 3: 0.92	Class 3: 0.84	Class 3: 0.92	Class 3: 0.84	Class 3: 0.84	
	Class 4: 0.88	Class 4: 0.84	Class 4: 0.88	Class 4: 1.0	Class 4: 1.0	

O modelo gerado pelo input multiespectral (Figura 4-6c) parece ter balanceado as vantagens de cada frequência, alcançando boas métricas de acurácia para ambos os esquemas de classificação (presença/ausência e 4 classes). Embora a frequência de 170 kHz tenha exibido um valor levemente mais

alto de acurácia do que o modelo multiespectral para prever as diferentes classes de coberturas de rodolitos, a matriz de confusão (Tabela 3) nos indica que os erros foram quantitativamente mais severos no modelo de 170 kHz quando comparados aos erros do output multiespectral se considerássemos a proximidade ou similaridade entre as classes de rodolitos; por exemplo, em uma determinada região cuja classificação deveria ser Classe 4, uma estação foi predita como Classe 3 pelo modelo multiespectral, enquanto uma estação foi predita como Classe 1 pelo modelo de 170 kHz. Os resultados em termos de presença ou ausência foram bastante similares entre o modelo multiespectral e os classificadores para 280/400 kHz.

Tabela 4-3: Matrizes de confusão considerando: a) presença ou ausência de rodolitos; b) modelos de quatro classes baseados na frequência de 170 kHz (que exibiu o maior valor de acurácia) e o multiespectral.

a)

	170 kHz		280 and 400 kHz		Multispectral	
	Absence	Presence	Absence	Presence	Absence	Presence
Absence	5	2	7	2	6	1
Presence	5	20	3	20	4	21

b)

	170 kHz				Multispectral			
	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4
Class 1	7	1	1	1	6	2	1	0
Class 2	0	6	0	0	2	6	0	0
Class 3	1	1	6	0	2	1	6	1
Class 4	2	1	0	5	0	0	0	5

4. DISCUSSÃO

Os métodos aplicados aos dados acústicos compuseram uma abordagem adequada para cumprir os objetivos propostos no capítulo, alcançando métricas de acurácia aceitáveis para classificação de habitat com base na cobertura de rodolitos. Em contraste com a lógica de abordagens não supervisionadas e até mesmo com a utilização convencional de verdades de campo em abordagens supervisionadas, as imagens coletadas nesse trabalho não foram utilizadas apenas para validar interpretação, mas foram de fato quantificadas de modo a gerar um dado para servir de treinamento para a classificação supervisionada empregada. Os resultados demonstraram relevância tanto no contexto de exploração do backscatter multifrequência como para diferenciar fundos de rodolitos, fornecendo informações que podem servir de suporte para futuras análises e políticas de gestão aplicadas a conservação desse habitat.

A classificação sugeriu uma tendência de presença mais expressiva de rodolitos na área norte – o que é coerente com o mapeamento prévio apresentado nessa região (Menandro et al, 2022). Fica evidente a partir do output do modelo SVM que utilizou todas as frequências (Figura 4-6c) que as diferenças de backscatter observadas no perfil cruzando os vales (Figura 4-4) foram de fato levadas em conta. No vale da área norte, as frequências mais altas registraram maiores valores de backscatter e foram classificadas como Classe 4, enquanto a frequência mais baixa obteve baixos valores de backscatter sugerindo que a rugosidade do fundo de rodolitos categorizado tem mais influência para comprimentos de onda correspondentes às frequências de 280 e 400 kHz. O vale localizado na área norte também foi diferenciado na classificação proposta em

Menandro et al (2022), porém não no contexto multiespectral, e sim utilizando apenas uma frequência de backscatter, mas também variáveis geomorfológicas e geomorfométricas implementadas numa técnica de classificação diferente. Na área sul, todas as frequências mostraram baixos valores de backscatter cruzando a região do vale e foram classificadas como Classe 1.

4.1. Vantagens do backscatter multiespectral

As análises e resultados gerados corroboram o uso do backscatter como importante indicador para classificação de habitat e substrato. O backscatter multiespectral aparece como solução efetiva tanto para fornecer informações acerca das diferentes concentrações de rodolitos como para prever a presença ou ausência de nódulos no fundo marinho.

O classificador SVM foi capaz de otimizar os benefícios proporcionados pelo backscatter multiespectral para a diferenciação do fundo do mar em comparação com o uso de dados de frequência única. Outros trabalhos exploraram tal potencial dos dados multifrequência em fundos lamosos e arenosos (Capítulo 3 – Menandro et al, 2022; Gaida et al, 2018; Brown et al, 2019), mas pela primeira vez isso é explorado em fundos *hardgrounds* e em rodolitos, aplicando as mesmas definições e configurações de classificação tanto para o input dos mosaicos individuais de cada frequência como para o backscatter multiespectral (RGB). As duas frequências mais altas, quando aplicadas separadamente como dado de entrada, indicaram uma boa discriminação da presença ou ausência de rodolitos. Já a frequência de 170 kHz foi essencial para modelar diferentes densidades de rodolitos. A obtenção de ambas as formas de classificação seria menos viável ou proveitosa utilizando um sistema de frequência única.

As curvas extraídas de acordo com a variação angular forneceram informações adicionais sobre a resposta acústica de cada frequência nas diferentes classes, contribuindo como complemento da abordagem de classificação baseada em imagens – como já proposto em alguns estudos que também utilizaram a combinação de abordagens (Che Hasan et al, 2014; Menandro et al, 2022). O mosaico RGB mais uma vez confirmou o potencial como ferramenta eficaz para visualizar as diferenças de backscatter de acordo com as frequências operadas. As curvas de resposta angular sugeriram que a frequência mais baixa foi crucial para diferenciar a porcentagem de cobertura de rodolitos entre classes, uma vez que a resposta angular das frequências mais altas foi muito semelhante para as diferentes proporções de cobertura de rodolitos, enquanto a resposta angular de 170 kHz facilitou a distinção, principalmente da Classe 2 para as Classes 3 e 4 (maior decréscimo dos valores de backscatter em direção aos feixes externos nas classes com mais rodolitos).

A ressalva que pode ser colocada no âmbito deste capítulo a uma abordagem de mapeamento multiespectral é que o grande volume de informação gerado por múltiplas frequências deve ser apoiado por uma amostragem de verdade de campo igualmente intensiva. Esse é provavelmente um dos maiores fatores limitantes acerca do mapeamento temático com dados de MBES multiespectral – isto é, a extração do máximo proveito desses dados acaba sendo limitada pela quantidade e qualidade dos dados de verdade de campo. Do mesmo modo, a falta de acurácia do posicionamento durante a coleta de imagens também pode refletir em redução da capacidade de relacionar as observações do fundo marinho com os dados acústicos. Portanto, a quantidade limitada de verdade de campo e a posição imprecisa durante a coleta possivelmente

representa um ponto de fragilidade que pode limitar substancialmente o nível de detalhe que pode ser extraído e resolvido através de dados multiespectrais. Futuras investigações com maior quantidade de amostras diretas (inclusive ao longo de um mesmo *swath* para correlação acurada com as curvas de resposta angular), incluindo talvez outros modelos classificatórios e testes de significância nas diferentes acurácias alcançadas poderiam contribuir para o melhor entendimento e assim guiar novas recomendações e estudos.

4.2. Resposta acústica multiespectral de fundos de rodolito

A caracterização acústica dos rodolitos é muito importante tanto para o estudo das relações entre o backscatter e a geodiversidade, como também para a biodiversidade, uma vez que os leitos de rodolitos são um importante substrato biogênico em termos ecológicos, visto que podem formar bancos sobre os sedimentos e são considerados bioengenheiros por acrescentar complexidade e tridimensionalidade ao fundo do mar. A classificação SVM aplicada aqui para mapear diferentes densidades de rodolitos corrobora a importância do backscatter como variável fundamental para a área temática de classificação do fundo marinho, fomentando ou alavancando sua utilização como uma "variável essencial de geodiversidade" (EGV) – importante indicador para o estudo da geo e da biodiversidade (Schrodt et al, 2019; Dolan et al, 2022). Innangi et al (2019) conseguiram demonstrar variações do backscatter em fundos de rodolitos quando associados a diferentes tipos de fundos marinhos, e Rocha et al (2020) interpretaram variações no mosaico de backscatter como sendo decorrentes da densidade variada de nódulos influenciadas pela morfologia. Vale ressaltar ainda que os resultados dessa pesquisa podem ainda ser relevantes para o estudo no contexto de *blue carbon* (Hunt et al, 2021) e estoques de carbono – embora ainda haja ressalvas e lacunas de conhecimento acerca da inclusão de rodolitos, macroalgas e *maërl* como ecossistemas que se enquadrem dentro dos conceitos de *blue carbon*, e também para o contexto sazonal (Schulze et al, 2022) relacionado com a cobertura de algas nos fundos de rodolitos.

Embora seja visualmente difícil detectar a diferença entre as classes de rodolitos 3 e 4 baseando-se no mosaico ou nas curvas de dependência angular, os valores de backscatter aumentam ligeiramente nas frequências mais altas da classe 3 para a 4; em outras palavras, a maior concentração de rodolitos resultou em um aumento da intensidade de backscatter para as frequências de 280 e 400 kHz, o que pode ser interpretado como uma maior dispersão do sinal acústico registrada nos comprimentos de onda mais curtos possivelmente gerada pela influência da rugosidade dos nódulos. Inversamente, observou-se uma diminuição do backscatter médio da classe 3 para a 4 (-22,6 e -24,5 dB, respetivamente) na frequência mais baixa. Já a classe 2, exibiu os valores médios de backscatter mais elevados extraídos dos mosaicos, apesar da menor concentração de rodolitos; do mesmo modo, o formato mais plano com pouca perda angular no backscatter da frequência de 170 kHz para a classe 2 também pode ser observado. Para melhor compreender estes resultados, vários fatores poderiam ter pormenores mais explorados, como por exemplo a relação entre o tipo de sedimento sotoposto aos rodolitos e a profundidade da região (por exemplo, as classes 3 e 4 tendem a estar em ambientes um pouco mais profundos do que a classe 2), a influência acústica de algas encrustadas à superfície dos nódulos no fundo do mar com maior concentração de rodolitos, e até mesmo o efeito potencial do sedimento sobreposto. Na ausência de uma análise granulométrica mais detalhada deste último efeito, podemos apenas inferir sobre a influência da maior presença de fragmentos de carbonato/cascalho na Classe 2 quando comparada às Classes 3 e 4. Por fim, é relevante realçar que as

comparações efetuadas entre frequências foram feitas de forma relativa, ou seja, comparando o formato das curvas e as tendências espaciais visíveis nos mosaicos de backscatter, visando evitar e excluir possíveis efeitos relacionados à calibração acústica nos valores absolutos de backscatter (dB), que consiste em um tema de investigação ativa (Roche et al, 2018) que certamente poderá contribuir ainda mais para a classificação do fundo marinho ao permitir a comparação de backscatter para diferentes tipos de fundo e diferentes sistemas.

Uma síntese dos estudos envolvendo mapeamento acústico de rodolitos é apresentada na Tabela 4. Nenhum destes estudos listados utilizou backscatter multiespectral, nem tampouco aplicou de maneira combinada as abordagens de análise baseadas em imagens e ARA. De um modo geral, os autores identificam que fundos de rodolitos estão geralmente associados a maior intensidade do backscatter, em coerência com resultados aqui apresentados sobre as frequências mais elevadas que obtiveram uma maior precisão considerando o modelo de presença ou ausência (ainda que a Classe 1 tenha englobado uma gama de tipos de fundos marinhos - mistos, arenosos e bioclastos). De maneira similar, resultados comparáveis com valores mais altos de backscatter para concentrações mais elevadas já foram observados no estudo de nódulos polimetálicos (Kuhn & Rühlemann, 2021). Assim, destaca-se que a capacidade de distinguir com êxito fundos mistos de fundos de rodolitos (incluindo diferentes padrões de cobertura) é um desfecho importante, que foi possibilitado pela utilização de múltiplas frequências, solucionando ou ao menos contribuindo para uma melhor compreensão de como otimizar e melhorar a distinção de fundos similares (que já foi objeto de estudo similares analisado em Parnum & Gavrilov, 2011; Micallef et al, 2012).

Tabela 4-4: Estudos relacionados ao mapeamento acústico de rodolitos listando os principais achados e as respectivas abordagens empregadas.

Referência	Abordagem	Resultados
Parnum and Gavrilov (2011)	Mosaicos e dependência angular baseados em um conjunto de dados de uma única frequência	Altos valores de backscatter em fundos de rodolito; resposta angular dos nódulos bem definidas, contudo, a principal limitação da classificação ficou localizada no limite entre areia e rodolito
Micallef et al (2012)	Frequência única, com backscatter não corrigido para variação angular	Padrão homogêneo de altos valores de backscatter em fundos de rodolitos; dificuldade na discriminação entre areia grossa/cascalho e fundos de rodolitos (e maërl) associados com areia e cascalho
Innangi et al (2019)	Frequência única, com o ponto de atenção de que algumas fácies acústicas mapeadas não foram amostradas adequadamente	Backscatter definido como intermediário e médio/baixo nos fundos com rodolitos
Chimienti et al (2020)	Combinação de amostragem, levantamentos visuais, e dados acústicos para análise dos padrões; fundo de rodolitos correspondendo a fundos com mais de 10% de cobertura de rodolitos	Densa cobertura de rodolitos identificada pelos altos valores de backscatter

Referência	Abordagem	Resultados
Rocha et al (2020)	Segmentação usando classificação <i>maximum likelihood</i> baseada em dados de uma só frequência, com backscatter não calibrado para dependência angular	Intensidade moderada para fundos com pouco rodolito; alta intensidade para fundos com alta cobertura de rodolitos
Menandro et al (2022)	Classificação baseada em dados de uma só frequência e atributos de terreno (batimetria, rugosidade e declividade) utilizando a ferramenta RSOBIA; backscatter não corrigido para dependência angular	Presença de rodolitos registradas em regiões com backscatter entre -22 dB a -24 dB (valores mais altos do que os fundos inconsolidados sem rodolitos)

5. CONCLUSÃO

Backscatter e imagens subaquáticas foram aplicados como base para treinar o modelo e gerar uma classificação do fundo marinho focada na distribuição de rodolitos. Os resultados demonstraram o potencial para distinguir classes distintas de cobertura de rodolitos e reforçam a importância do dado de backscatter multiespectral como indicador de substratos biogênicos e de outros tipos de fundo. Novas informações sobre esses nódulos carbonáticos foram geradas e exploradas, culminando na classificação SVM baseada nos dados multifrequência que foi capaz de mapear rodolitos na APA Costa das Algas.

Os dados de backscatter multiespectral foram classificados com sucesso, alcançando boas métricas de acurácia e confirmando o potencial para melhorar a discriminação do fundo do mar, isto é, ficou claro a partir do uso do mesmo classificador que ao utilizarmos as três frequências combinadas obtém-se um resultado mais interessante. A frequência de 170 kHz foi diferencial para distinguir a cobertura variável de rodolitos, enquanto as outras duas frequências mais altas foram melhores preditoras de presença e ausência. Além disso, as análises de variação angular forneceram mais informações descritivas sobre as assinaturas espectrais para os fundos de rodolitos, mostrando, por exemplo, padrões inesperados de diminuição marcante dos valores de backscatter conforme aumenta o ângulo de incidência nos fundos de rodolitos, principalmente para a frequência mais baixa.

Os resultados deste estudo mostraram que a heterogeneidade característica dos fundos de rodolitos pode ser mapeada e diferenciada utilizando dados de backscatter multiespectral classificados por SVM, bem como a possibilidade de identificar a presença ou ausência de nódulos. Este resultado é um avanço importante para o mapeamento acústico em alta resolução de rodolitos, demonstrando que a estrutura de fundos de rodolitos pode ser mapeada utilizando sensoriamento remoto acústico multiespectral.

REFERÊNCIAS

- Alevizos, E. & Greinert, J. The Hyper-Angular Cube Concept for Improving the Spatial and Acoustic Resolution of MBES Backscatter Angular Response Analysis. *Geosciences* 8, 446 (2018).
- Amado-Filho, G. M. et al. Rhodolith Beds Are Major CaCO₃ Bio-Factories in the Tropical South West Atlantic. *PLoS ONE* 7, e35171 (2012).
- Bahia, R. G., Abrantes, D. P., Brasileiro, P. S., Pereira Filho, G. H. & Amado Filho, G. M. Rhodolith bed structure along a depth gradient on the northern coast of bahia state, brazil. *Braz. j. oceanogr.* 58, 323–337 (2010).
- Basso, D., Babbini, L., Kaleb, S., Bracchi, V. A. & Falace, A. Monitoring deep Mediterranean rhodolith beds. *Aquatic Conserv: Mar. Freshw. Ecosyst.* 26, 549–561 (2016).
- Bosence, D. W. J. Coralline algal reef frameworks. *JGS* 140, 365–376 (1983).
- Brown, C. J. & Blondel, P. Developments in the application of multibeam sonar backscatter for seafloor habitat mapping. *Applied Acoustics* 70, 1242–1247 (2009).
- Brown, C., Beaudoin, J., Brissette, M. & Gazzola, V. Multispectral Multibeam Echo Sounder Backscatter as a Tool for Improved Seafloor Characterization. *Geosciences* 9, 126 (2019).
- Burges, C. J. C. A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition. *Data Mining and Knowledge Discovery* 2, 121–167 (1998).
- Che Hasan, R., Ierodiaconou, D. & Monk, J. Evaluation of Four Supervised Learning Methods for Benthic Habitat Mapping Using Backscatter from Multi-Beam Sonar. *Remote Sensing* 4, 3427–3443 (2012).
- Che Hasan, R., Ierodiaconou, D., Laurenson, L. & Schimel, A. Integrating Multibeam Backscatter Angular Response, Mosaic and Bathymetry Data for Benthic Habitat Mapping. *PLoS ONE* 9, e97339 (2014).
- Chimienti, G. et al. Rhodolith Beds Heterogeneity along the Apulian Continental Shelf (Mediterranean Sea). *JMSE* 8, 813 (2020).
- Cui, X. et al. Seafloor habitat mapping using multibeam bathymetric and backscatter intensity multi-features SVM classification framework. *Applied Acoustics* 174, 107728 (2021).
- De Falco, G. et al. Relationships between multibeam backscatter, sediment grain size and *Posidonia oceanica* seagrass distribution. *Continental Shelf Research* 30, 1941–1950 (2010).
- Diesing, M., Mitchell, P. & Stephens, D. Image-based seabed classification: what can we learn from terrestrial remote sensing? *ICES J. Mar. Sci.* 73, 2425–2441 (2016).
- Diesing, M., Mitchell, P. J., O’Keeffe, E., Gavazzi, G. O. A. M. & Bas, T. L. Limitations of Predicting Substrate Classes on a Sedimentary Complex but Morphologically Simple Seabed. *Remote Sensing* 12, 3398 (2020).
- Dolan, M., Bøe, R. & Bjarnadóttir, L. R. Delivering seabed geodiversity information through multidisciplinary mapping initiatives: experiences from Norway. *GEUS Bulletin* 52, (2022).
- Eugenio, F., Marcello, J. & Martin, J. High-Resolution Maps of Bathymetry and Benthic Habitats in Shallow-Water Environments Using Multispectral Remote Sensing Imagery. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 53, 3539–3549 (2015).
- Fakiris, E. et al. Multi-Frequency, Multi-Sonar Mapping of Shallow Habitats—Efficacy and Management Implications in the National Marine Park of Zakynthos, Greece. *Remote Sensing* 11, 461 (2019).
- Figueiredo, M. de O., Menezes, K. S. de, Costa-Paiva, E., Paiva, P. & Ventura, C. Experimental evaluation of rhodoliths as living substrata for infauna at the Abrolhos Bank, Brazil. *Ciencias marinas* 33, 427–440 (2007).
- Foster, M. S. Rhodoliths: between rocks and soft places. *J Phycol* 37, 659–667 (2001).
- Gaida, T. et al. A Multispectral Bayesian Classification Method for Increased Acoustic Discrimination of Seabed Sediments Using Multi-Frequency Multibeam Backscatter Data. *Geosciences* 8, 455 (2018).
- Hijmans R., 2022. *_terra: Spatial Data Analysis_*. R package version 1.6-47, <<https://CRAN.R-project.org/package=terra>>
- Horta, P. A. et al. Rhodoliths in Brazil: Current knowledge and potential impacts of climate change. *Braz. j.*

- oceanogr. 64, 117–136 (2016).
- Huang, C., Davis, L. S. & Townshend, J. R. G. An assessment of support vector machines for land cover classification. *International Journal of Remote Sensing* 23, 725–749 (2010).
- Hughes Clarke, J.E. Multispectral Acoustic Backscatter from Multibeam, Improved Classification Potential. In *Proceedings of the US Hydrographic Conference, National Harbor, MI, USA*, p. 18 (2015)
- Hunt, C. A., Demšar, U., Marchant, B., Dove, D. & Austin, W. E. N. Sounding Out the Carbon: The Potential of Acoustic Backscatter Data to Yield Improved Spatial Predictions of Organic Carbon in Marine Sediments. *Front. Mar. Sci.* 8, 756400 (2021).
- Ierodionou, D. et al. Combining pixel and object based image analysis of ultra-high resolution multibeam bathymetry and backscatter for habitat mapping in shallow marine waters. *Mar Geophys Res* 39, 271–288 (2018).
- Innangi, S. et al. Seabed mapping in the Pelagie Islands marine protected area (Sicily Channel, southern Mediterranean) using Remote Sensing Object Based Image Analysis (RSOBIA). *Mar Geophys Res* 40, 333–355 (2019).
- Kuhn, M. Building Predictive Models in R Using the caret Package. *J. Stat. Soft.* 28, (2008).
- Kuhn, T. & Rühlemann, C. Exploration of Polymetallic Nodules and Resource Assessment: A Case Study from the German Contract Area in the Clarion-Clipperton Zone of the Tropical Northeast Pacific. *Minerals* 11, 618 (2021).
- Lamarche, G. & Lurton, X. Recommendations for improved and coherent acquisition and processing of backscatter data from seafloor-mapping sonars. *Mar Geophys Res* 39, 5–22 (2018).
- Lucieer, V., Hill, N. A., Barrett, N. S. & Nichol, S. Do marine substrates ‘look’ and ‘sound’ the same? Supervised classification of multibeam acoustic data using autonomous underwater vehicle images. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 117, 94–106 (2013).
- Mantero, P., Moser, G. & Serpico, S. B. Partially Supervised classification of remote sensing images through SVM-based probability density estimation. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 43, 559–570 (2005).
- Marsh, I. & Brown, C. Neural network classification of multibeam backscatter and bathymetry data from Stanton Bank (Area IV). *Applied Acoustics* 70, 1269–1276 (2009).
- Matsuda, S. & Iryu, Y. Rhodoliths from deep fore-reef to shelf areas around Okinawa-jima, Ryukyu Islands, Japan. *Marine Geology* 282, 215–230 (2011).
- Menandro, P. S. et al. The role of benthic habitat mapping for science and managers: A multi-design approach in the Southeast Brazilian Shelf after a major man-induced disaster. *Front. Mar. Sci.* 9, 1004083 (2022).
- Menandro, P. S., Bastos, A. C., Misiuk, B. & Brown, C. J. Applying a Multi-Method Framework to Analyze the Multispectral Acoustic Response of the Seafloor. *Front. Remote Sens.* 3, 860282 (2022).
- Meyer, D., Dimitriadou, E., Hornik, K., Weingessel, A., Leisch, F., 2023. `_e1071`: Misc Functions of the Department of Statistics, Probability Theory Group (Formerly: E1071), TU Wien. R package version 1.7-13, <<https://CRAN.R-project.org/package=e1071>>
- Micallef, A. et al. A multi-method approach for benthic habitat mapping of shallow coastal areas with high-resolution multibeam data. *Continental Shelf Research* 39–40, 14–26 (2012).
- Misiuk, B. & Brown, C. J. Multiple imputation of multibeam angular response data for high resolution full coverage seabed mapping. *Mar Geophys Res* 43, 7 (2022).
- Mountrakis, G., Im, J. & Ogole, C. Support vector machines in remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66, 247–259 (2011).
- Nelson, W. A. Calcified macroalgae - critical to coastal ecosystems and vulnerable to change: a review. *Mar. Freshwater Res.* 60, 787 (2009).
- Oliveira, N. de, Lavagnino, A. C., Rocha, G. A., Moura, R. L. de & Bastos, A. C. Geomorphological significance of shelf-incised valleys as mesophotic habitats. *Front. Remote Sens.* 4, 1111825 (2023).
- Parnum, I. M. & Gavrilov, A. N. High-frequency multibeam echo-sounder measurements of seafloor backscatter in shallow water: Part 2 – Mosaic production, analysis and classification. *uw tech: int j soc uw tech* 30, 13–26 (2011).

- Porskamp, P., Rattray, A., Young, M. & Ierodiaconou, D. Multiscale and Hierarchical Classification for Benthic Habitat Mapping. *Geosciences* 8, 119 (2018).
- Rende, S. F. et al. Ultra-High-Resolution Mapping of *Posidonia oceanica* (L.) Delile Meadows through Acoustic, Optical Data and Object-based Image Classification. *JMSE* 8, 647 (2020).
- Rendina, F., Buonocore, E., di Montanara, A. C. & Russo, G. F. The scientific research on rhodolith beds: A review through bibliometric network analysis. *Ecological Informatics* 70, 101738 (2022).
- Rocha, G. A. et al. Heterogeneity of rhodolith beds expressed in backscatter data. *Marine Geology* 423, 106136 (2020).
- Roche, M. et al. Control of the repeatability of high frequency multibeam echosounder backscatter by using natural reference areas. *Mar Geophys Res* 39, 89–104 (2018).
- Rowden, A. A. et al. High-Resolution Habitat Suitability Models for the Conservation and Management of Vulnerable Marine Ecosystems on the Louisville Seamount Chain, South Pacific Ocean. *Front. Mar. Sci.* 4, 335 (2017).
- Runya, R. M. et al. Examining the Links between Multi-Frequency Multibeam Backscatter Data and Sediment Grain Size. *Remote Sensing* 13, 1539 (2021).
- Schimel, A. C. G. et al. Multibeam sonar backscatter data processing. *Mar Geophys Res* 39, 121–137 (2018).
- Schrodt, F. et al. To advance sustainable stewardship, we must document not only biodiversity but geodiversity. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 116, 16155–16158 (2019).
- Schulze, I., Gogina, M., Schönke, M., Zettler, M. L. & Feldens, P. Seasonal change of multifrequency backscatter in three Baltic Sea habitats. *Front. Remote Sens.* 3, 956994 (2022).
- Stephens, D. & Diesing, M. A Comparison of Supervised Classification Methods for the Prediction of Substrate Type Using Multibeam Acoustic and Legacy Grain-Size Data. *PLoS ONE* 9, e93950 (2014).
- Trzcinska, K. et al. Spectral features of dual-frequency multibeam echosounder data for benthic habitat mapping. *Marine Geology* 427, 106239 (2020).
- Vieira, F. V. et al. Along-shelf changes in mixed carbonate-siliciclastic sedimentation patterns. *Continental Shelf Research* 187, 103964 (2019).
- Wicaksono, P., Aryaguna, P. A. & Lazuardi, W. Benthic Habitat Mapping Model and Cross Validation Using Machine-Learning Classification Algorithms. *Remote Sensing* 11, 1279 (2019).
- Zhang, C. Applying data fusion techniques for benthic habitat mapping and monitoring in a coral reef ecosystem. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 104, 213–223 (2015).

CAPÍTULO 5

Síntese e considerações finais

1. BACKSCATTER COMO VARIÁVEL ESSENCIAL EM ESTUDOS DE GEODIVERSIDADE

O desenvolvimento tecnológico da acústica submarina vem permitindo nas últimas décadas o estudo e aprimoramento de técnicas para classificação do fundo marinho, resultando em diversas ferramentas baseadas em diferentes tipos de dados, com abordagens multidisciplinares para construir modelos de classificação e distribuição espacial dos tipos de fundo e habitat marinhos. No âmbito do mapeamento do fundo marinho, Schrodt et al (2019) e Dolan et al (2022) chamam a atenção para um conceito de variáveis essenciais de geodiversidade (Essential Geodiversity Variables - EGVs), que são relacionadas principalmente a geomorfologia e geologia do ambiente marinho. Essa discussão passou a ganhar proeminência após a constatação de que entre as variáveis essenciais para o oceano (Essential Ocean Variables) definidas para questões climáticas no contexto dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas nenhuma incluía variáveis relevantes relacionadas ao fundo marinho. Assim, a ideia principal é advogar pelo reconhecimento da geodiversidade (que geralmente suporta uma biodiversidade proporcional à complexidade, além de estar relacionada a questões como pesca, riscos geológicos, mineração, conservação, navegação, estoques de carbono, etc) como variável essencial para integrar abordagens holísticas nas questões de desenvolvimento sustentável e mudanças climáticas. Nesse cenário, o backscatter figura não ainda como protagonista, mas certamente é um coadjuvante especialmente importante e frequente nos trabalhos relacionados a geodiversidade e ainda tem muita a ser explorado.

A revisão bibliométrica apresentada no Capítulo 2 destacou que a inversão de dados acústicos em propriedades físicas do fundo marinho já vem sendo objeto de estudo ao menos desde a década de 1960, com os trabalhos de McKinney & Anderson (1964) e Nafe & Drake (1961). Com o uso mais acessível e disseminado do multifeixe como ferramenta de mapeamento do fundo marinho, o backscatter foi ganhando importância como variável para estudo das propriedades do sedimento, e nas últimas três décadas figura entre os principais proxies que motivam e possibilitam variados estudos relacionados ao mapeamento do assoalho oceânico, alimentando diferentes algoritmos de classificação do fundo marinho. Na última década, a importância do backscatter é ainda mais consolidada, sendo um termo recorrente em quase todos os anos, culminando com fatos importantes como edições especiais de revistas da área e a criação do Backscatter Working Group (BSWG). Em consonância, a coletânea de Harris and Baker (2020) aponta o backscatter como uma das variáveis mais medidas e mais úteis no conjunto considerado de publicações referentes a mapeamento de habitat.

Os capítulos 3 e 4, apesar do viés mais metodológico de exploração das diferentes frequências e abordagens, também corroboraram o potencial que o backscatter carrega para investigar diferentes substratos para

diferentes fins, como distribuição de tipos de fundo, conservação de habitats sensíveis e até mesmo o aprimoramento do mapeamento de lama no contexto de profundidade náutica.

Iniciativas como a do Serviço Geológico da Noruega com o programa de mapeamento MAREANO (Marine areal database for Norwegian sea areas) - Buhl-Mortensen et al (2015), Buhl-Mortensen et al (2015), Dolan et al (2022) - constituem ótimos modelos a serem trilhados, desenvolvendo mapas temáticos que utilizam o backscatter como variável para compor os atributos do fundo marinho possibilitando e facilitando diversas aplicações para variados usuários. Outros programas um pouco mais recentes também mostram com sucesso como aproveitar o backscatter como proxy para características do fundo oceânico, como na Austrália (Lucieer et al, 2019) e no Canadá (Côté et al, 2012; Pickrill & Kostylev, 2007; Pickrill et al, 2014). No Canadá, as pesquisas conseguiram relacionar propriedades acústicas do backscatter com a biomassa de vieiras, o que revolucionou e melhorou a taxa de captura, ao passo que diminuiu impactos de arrasto e preservou áreas cuja captura não era propícia (Kostylev et al, 2013).

Baseando-se nesses exemplos, a conclusão inequívoca parece ser a inclusão do backscatter como variável essencial de geodiversidade, promovendo todo seu já conhecido potencial em resultados para diversas aplicações, dentre as quais destaco aqui a integração em abordagens de *ecosystem-based management* e na composição de planejamento espacial marinho.

2. PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES CONTEXTUALIZADAS AO CENÁRIO CIENTÍFICO INTERNACIONAL DE BACKSCATTER

O Brasil é um país que possui uma área oceânica (somando as reivindicações em andamento a Zona Econômica Exclusiva) que equivale a 52% da área territorial (informação no site da Marinha do Brasil), mas que ainda hoje não possui um programa de planejamento espacial marinho implementado. Apesar desse revés, o grid batimétrico global incorporado ao GEBCO mostra que aproximadamente 32% dos dados são provenientes de batimetria multifeixe, o que pode ser enquadrado como acima da média global. Apesar dessa razoável quantidade de dados de batimetria multifeixe, o dado de backscatter não está disponível em nenhum tipo de repositório (ou não foi sequer coletado).

Ainda contextualizando o Brasil no cenário global, ao analisarmos a última coletânea de capítulos sobre mapeamento de habitats de Harris and Baker (2020) verifica-se que dos 7 trabalhos brasileiros que compõem o livro, nenhum deles utiliza MBES backscatter. Vale destacar que a importância do backscatter coletado por sonares de varredura lateral não é questionável, dada a consolidada importância do método já enfatizada em trabalhos como o capítulo 2 e em Brown et al (2011). No Brasil, muitos estudos baseados em dados de sonar de varredura foram desenvolvidos para diversas aplicações (Moura et al, 2013; Sperle et al, 2015; Vieira et al, 2019). A comparação entre dados de backscatter oriundos de MBES ou sonar de varredura é um tópico de estudo que pode envolver diversos aspectos e variáveis (Le Bas & Huvenne, 2009), e, assim como advogar por um ou outro dado, é uma questão que não está no escopo desse trabalho haja vista o foco único no backscatter de MBES. Assim, uma das principais realizações ao final desse trabalho de doutorado proposto foi contribuir para fortalecer o Brasil na vanguarda científica no que tange aos métodos de mapeamento e classificação do fundo marinho, principalmente considerando o MBES backscatter. O backscatter multiespectral configura hoje um dos mais inovadores temas ou ramos do

BSWG, e as técnicas de se explorar e classificar o dado de backscatter (análise baseada na imagem, análise baseada na variação e dependência angular, classificações fundamentadas em *machine learning* - segmentação e redução dimensional, *density-based clustering*, *Support Vector Machine*) também compõem outro grande tema.

Tentando ilustrar a participação do Brasil no cenário científico no que diz respeito a trabalhos que utilizam o backscatter para mapeamento do fundo marinho, foi realizada uma mineração dos artigos agrupando dois recentes triênios: 63 artigos de 2017/2018/2019 e 62 artigos de 2020/2021/2022. A proposta é mostrar onde vem sendo desenvolvidos esses trabalhos. O país considerado foi onde foi feita a coleta de dados, com a exceção de quando o primeiro autor trabalha em um Instituto baseado em um país diferente de onde foi feita a coleta de dados (exemplo: artigo com primeiro autor brasileiro, mas com dados na Antártica; artigo com primeiro autor chinês com dados coletados na França). Nesses casos, os dois países foram contabilizados. Os resultados foram espacializados em mapas de anamorfose (Figura 5-1), nos quais o maior tamanho do país indica um maior número de publicações.

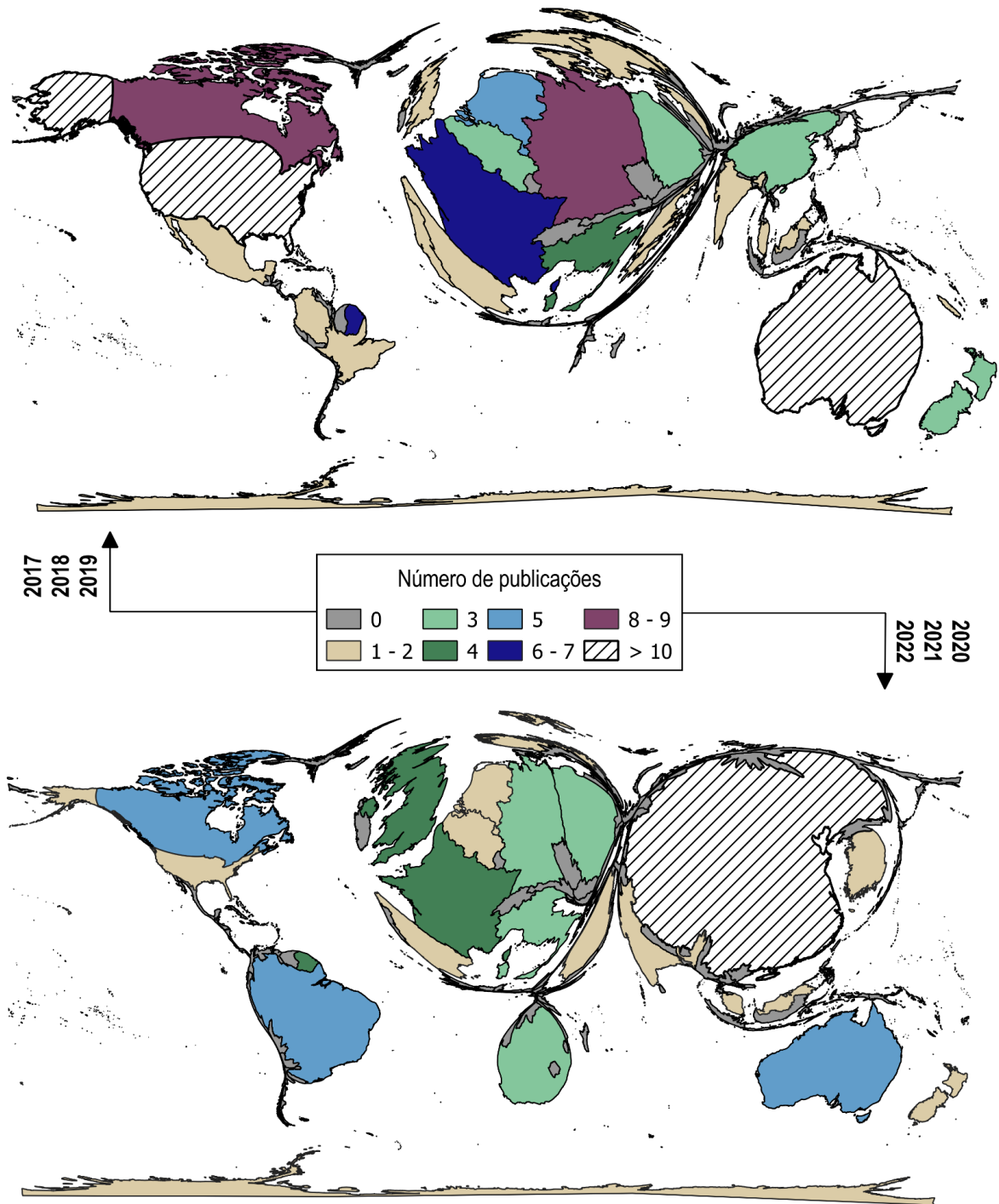


Figura 5-1: Mapa de anamorfose considerando artigos de backscatter no período entre 2017-2019 e 2020-2022.

A partir da interpretação visual dos mapas, algumas constatações devem ser enfatizadas: i) Canadá, França, Alemanha, Holanda e Austrália figuram dentre os principais pesquisadores de backscatter nos dois períodos; ii) no mapa mais recente, vale destacar a presença do Brasil como um importante ator desse cenário; iii) também no segundo triênio, surgimento da África do Sul com o desenvolvimento de importantes trabalhos; iv) no período mais recente, a China aparece com um volume de trabalhos enorme, em desbalanço com o restante do mundo, a exemplo do que acontece também em outras áreas das ciências marinhas. Há de se pontuar ainda a questão do período de pandemia, cujos impactos, apesar de ainda difíceis

de mensurar, certamente ocorreram em termos de desenvolvimento de projetos relacionados a esse tipo de produção científica.

Considerando a crescente presença do Brasil, os trabalhos estão geralmente relacionados ao processamento e calibração dos dados, interpretação e classificação, e exploração e classificação de backscatter multiespectral. Apesar do cuidado necessário para não tocar as raízes da imodéstia e pretensão, podemos afirmar que os capítulos desenvolvidos e publicados contribuíram para esse crescimento do Brasil no mapa de publicações associadas ao backscatter.

3. PANORAMA ATUAL DO BACKSCATTER MULTIESPECTRAL E AS PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES ALCANÇADAS

A Tabela 1 abaixo lista os trabalhos disponíveis que exploraram dados de MBES backscatter multiespectral. Os primeiros trabalhos listados ainda são baseados em levantamentos repetidos com frequências diferentes (Hughes Clarke, 2015; Feldens et al, 2018) ou em conjunto de dados de fontes diferentes (Lacharité et al, 2018). Em 2017 foi lançado e fomentado o desafio multiespectral (R2Sonic *Multispectral Challenge*), uma iniciativa que tornou publicamente disponível um conjunto de dados de batimetria e backscatter multiespectral, e que resultou no desenvolvimento de alguns trabalhos com diferentes abordagens e as mesmas frequências.

Tabela 5-1: Literatura científica relacionada a backscatter multiespectral

Referência	Frequências	Tipo de fundo	Método aplicado
Hughes Clarke (2015)	70-100, 200, 300 e 400 kHz	Areia, cascalho e recifes	Exploração de resultados experimentais de diferentes levantamentos em diferentes áreas
Lacharité et al (2018)	70-100, 95, 100 e 300 kHz	Lama, areia, cascalho, glacial till	Segmentação de imagem (eCognition), harmonização de diferentes fontes e classificação de benthoscape
Buscombe et al (2018)	100, 200 e 400 kHz	Areia, lama, cascalho	Modelo CRF (fully-connected conditional Random field) baseado na estatística e na proximidade espacial relativa dos substratos
Feldens et al (2018)	200, 400 e 600 kHz	Areia	3 levantamentos, exploração dos mosaicos e das curvas de resposta angular
Gaida et al (2018)	100, 200 e 400 kHz	Rochoso, cascalho, areia, lama	Mosaicos, curva de resposta angular, classificação baseada no método Bayesiano
Janowski et al (2018)	150 e 400 kHz	Areia, cascalho, boulders.	Extração e seleção de variáveis secundárias e classificação supervisionada de imagem (CART, SVM, RF, KNN)

Referência	Frequências	Tipo de fundo	Método aplicado
Brown et al (2019)	100, 200 e 400 kHz	Lama, cobbles/boulders, gravel/cobbles/boulders	Exploração e comparação dos dados
Costa et al (2019)	100, 200 e 400 kHz	Rock, cobble, lama, bare, clams, limpets, urchins	Caracterização das propriedades acústicas para os diferentes tipos de fundo
Misiuk et al (2020)	100, 200 e 400 kHz	Lama, cascalho e bedrock	Bulk shift para harmonizar diferentes conjuntos de dados
Trzcinska et al (2020)	150 e 400 kHz	Areia e boulders	Algoritmo Boruta (Random forest), OBIA/eCognition
Runya et al (2021)	30, 95 e 300 kHz	Cascalho e areia	Parâmetros texturais (GLCM)
Menandro et al (2022)	170, 280, 400 e 700 kHz	Lama e areia	Mosaicos, curva de resposta angular, segmentação para redução dimensional, density-based cluster
Schulze et al (2022)	200, 400, 550 e 700 kHz	Areia, cascalho, seagrass e recife	Mosaicos e curva de resposta angular

Uma das mais recorrentes constatações desses trabalhos é a de que dados multifrequência possibilitam uma melhor caracterização dos tipos de fundo marinho. Tanto o capítulo 3 quanto o capítulo 4 seguem a linha dessa afirmação. O capítulo 3 está inserido nessa tabela trazendo a abordagem do *density-based clustering* pela primeira vez no âmbito de classificação acústica do fundo marinho, além de considerar e tratar a questão da dimensionalidade dos dados, o que ainda é pouco explorado apesar de já existirem de certa forma variados algoritmos que realizam seleção de variáveis. Já o capítulo 4 adiciona pela primeira vez os fundos de rodolitos no panorama de backscatter multiespectral, relacionando a resposta espectral à concentração dos nódulos. Importante ressaltar que em ambos os capítulos, tanto a abordagem de classificação por imagem quanto a de resposta angular foram consideradas e implementadas nas análises. A utilização das frequências de 170, 280 e 700 kHz, apesar de ser diferente dos outros trabalhos não é algo cujo ineditismo seja tão notório visto que está mais relacionada a configuração e limite do equipamento, mas certamente agrega informações espectrais desses tipos de fundo estudados, além de fornecerem objeto de estudo para harmonização de diferentes conjuntos de dados, a exemplo do que foi realizado no estudo de classificação de habitat na APA Costa das Algas em Menandro et al (2022), onde foram harmonizados dados de 170 kHz e 240 kHz de diferentes equipamentos utilizando a metodologia *bulk shift* (Misiuk et al, 2020).

O objetivo geral inicialmente apresentado ainda na fase de projeto de doutorado e na qualificação foi o de compreender e detalhar como o backscatter multiespectral responde a diferentes tipos de fundo, buscando incrementar a classificação do fundo marinho. Assim, sintetizando as abordagens e os achados principais de cada capítulo:

- i) capítulo 2: conseguiu demonstrar a evolução e importância do mapeamento do fundo marinho, e como o backscatter ganhou espaço nos últimos anos com o desenvolvimento da tecnologia. Além do artigo publicado na revista *Geosciences*, o texto também ganhou espaço em uma revista de divulgação (*HydroInternational*), o que é importante para difundir a relevância do mapeamento do fundo marinho e do backscatter;
- ii) capítulo 3: conseguiu combinar abordagens baseada na imagem (mosaicos) e nas respostas angulares, além de aplicar técnicas de redução dimensional do volume de dados, para gerar uma classificação do fundo marinho em uma região de sedimento mais fino. Os resultados demonstraram vantagens do método multiespectral, mostrando diferentes influências na resposta acústica de acordo com o tipo de fundo e conseguindo diferenciar fundos mais lamosos e de areia fina, e mostrando que para areias médias/grossa/cascalho as diferenças espectrais não são tão vantajosas do ponto de vista de diferenciação do fundo marinho. Além disso, gerou um script (R) acessível e replicável que consiste em uma ferramenta de análise (*density-based clustering*) do fundo marinho capaz de agregar dados de backscatter, batimetria e outras derivadas para gerar uma classificação. Resultou em publicação de acesso aberto em prestigiada revista internacional na área temática;
- iii) capítulo 4: também combinando as abordagens baseada na imagem (mosaicos) e nas respostas angulares, aplicou metodologia já consolidada na área de sensoriamento remoto por satélites (também multiespectral) para explorar a assinatura acústica de rodolitos, gerando um modelo para classificação do fundo marinho. Além do importante resultado da diferenciação da concentração dos nódulos de acordo com a resposta acústica multifrequência e da capacidade de diferenciar a presença ou ausência de rodolitos, essa parte do trabalho conseguiu utilizar as imagens como parte do dado de entrada para treinamento do modelo, e não apenas como uma verdade de campo para validação de interpretação. Além disso, foi construído com base em um script em ambiente R combinando uma série e funções e pacotes e gerando mais uma ferramenta de fonte aberta e replicável para análise e classificação do fundo marinho. Também resultou em publicação em revista internacional de alto impacto e acesso aberto.

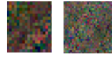
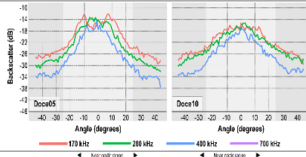
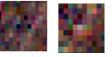
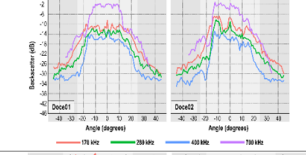

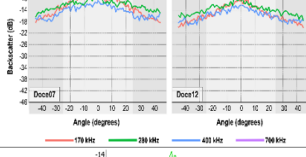

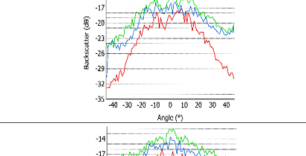

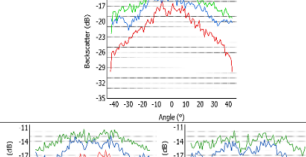
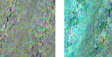
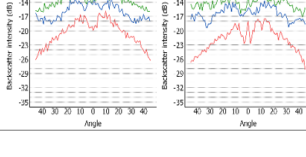
Assim, os resultados conseguiram alcançar o objetivo proposto, de explorar o potencial do backscatter multiespectral para melhorar a distinção de diferentes tipos de fundo. É possível concluir com o conjunto de capítulos apresentados que a aplicação das diferentes frequências foi vantajosa (principalmente para fundos de lama, de areia fina e de rodolitos), e de que seria possível obter um efeito parecido em termos de diferenciação de tipos de fundo caso fosse utilizada a maior variação espectral possível (170 e 400 kHz), isto é, a utilização da frequência intermediária (280 kHz, neste caso) poderia ser suprimida, o que acabaria aumentando a resolução *along track* das outras frequências sem perda considerável de informação para a classificação. Ainda assim, vale ressaltar que a assinatura espectral de cada frequência para cada tipo de fundo ainda é algo que está sendo construído no contexto de classificação do fundo marinho, o que realça a importância dos resultados obtidos utilizando-se três frequências. Finalizando, mesmo indicando que a aplicação multispectral tenha sido vantajosa, a aplicação de uma mesma abordagem de classificação dos dados não foi a melhor alternativa, o que demonstra que a escolha e aplicação do método pode ser testada

e definida de acordo com o conjunto de dados (a exemplo de *ensemble modelling* – Galvez et al, 2022) para analisar a performance das frequências, que nos capítulos apresentados foram o *density-based cluster* e o SVM.

Os levantamentos utilizados nesse trabalho também geraram uma série de produtos paralelos não relacionados com a tese, já que os dados foram coletados no âmbito de um projeto muito maior e abrangente. Os dados de backscatter na região do Rio Doce e da APA Costa das Algas também foram classificados utilizando outra metodologia focada no mapeamento de habitats em Menandro et al (2022, *The role of benthic habitat mapping for Science and managers: A multi-design approach in the Southeast Brazilian Shelf after a major man-induced disaster – Frontiers in Marine Science*). Já as imagens de dropcameras foram incorporadas em um projeto para gerar um algoritmo de classificação automática utilizando redes neurais e *deep learning* (trabalho “*BenthicNet: A global dataset of seafloor photography for deep learning applications*”, em fase de finalização para submissão do artigo). Vale ressaltar que a classificação das imagens ainda é uma temática delicada visto que muitas vezes é tratada qualitativamente, e a utilização e quantificação das áreas de rodolito foi uma alternativa interessante para não haver os questionamentos que poderiam aparecer em caso de uma classificação puramente visual.

A resposta acústica multiespectral de diferentes tipos de fundo alcançada nesse trabalho é apresentada de maneira sintetizada no formato de um dicionário de tipos de fundo e as respectivas características encontradas (Tabela 2). É uma informação que apesar do teor descritivo, pode ser útil para futura comparação de tipos de fundo de maneira relativa, monitoramento da mesma área para estudos de calibração absoluta dos dados acústicos, e até mesmo incremento de modelos de harmonização de dados.

Tabela 5-2: Resposta acústica de diferentes tipos de fundo investigados nesse trabalho.

<i>Tipo de fundo</i>	Padrão RGB	Curva da resposta angular por frequência	Local
<i>Fundo lamoso</i>			Plataforma continental adjacente ao Rio Doce
<i>Areia fina</i>			Plataforma continental adjacente ao Rio Doce
<i>Areia média/grossa/cascalho</i>			Plataforma continental adjacente ao Rio Doce
<i>Areia fina (visual)</i>			APA Costa das Algas
<i>Areia média (visual)</i>			APA Costa das Algas
<i>Rodolito</i>			APA Costa das Algas

4. PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS E DESAFIOS

Os trabalhos futuros envolvendo backscatter estão ligados aos desafios atuais, dentre os quais ressalto: armazenamento de dados, representação espacial adequada associada a resolução, exploração/seleção das metodologias, extração das derivadas e redução dimensional do resultado, e integração com outras variáveis para compor modelos cada vez mais robustos. Especificamente para o backscatter multiespectral, aspectos associados ao processamento, calibração, metodologia de análise e redução dimensional são fundamentais para o avanço desta aplicação; algumas dessas temáticas também aparecem no questionário recentemente promovido pelo BSWG para construir um panorama global do backscatter, que certamente irá contribuir, entre outras coisas, para indicar as principais lacunas e até mesmo para angariar verbas de pesquisa para determinadas questões e aplicações.

Apesar de que o desenvolvimento de um campo parece truncar o avanço de outro, temáticas como processamento e calibração de dados não necessariamente devem frear o desenvolvimento de outros campos, como de abordagens para analisar dados de backscatter da coluna d'água ou classificações baseadas em valores “não-calibrados” e harmonização de diferentes equipamentos ou softwares. O desenvolvimento desses ramos, ainda que avancem eventualmente de maneira mais específica e independente, acabam convergindo posteriormente para abordagens mais completas e acuradas.

Um outro desafio é promover e divulgar o backscatter para fins não científicos, tanto em águas rasas como em águas profundas. Em águas rasas as aplicações possíveis são diversas e bastante subaproveitadas atualmente (ex.: caracterização do tipo de fundo para projetos de dragagem, planejamento espacial marinho, delineamento de áreas de conservação), e o maior volume de informação disponível, caso o uso mais difundido do backscatter ocorresse para esses fins, acabaria alimentando também estudos para validação e desenvolvimento/aprimoramento das técnicas de análise. Já em águas profundas, existem algumas peculiaridades que devem ser pontuadas. Quando o dado é coletado com o equipamento fixado no barco, existe uma limitação de resolução já que a frequência para águas profundas precisa ser mais baixa. Por outro lado, quando o dado é coletado por plataformas autônomas como AUV's, o custo financeiro é ainda mais elevado.

No Brasil, independentemente da profundidade considerada, a divulgação do potencial do backscatter é necessária para que o dado ganhe visibilidade e assim comece a ser incorporado por variados tipos de projetos como os relacionados a P&D, engenharia, planejamento espacial marinho. Ao longo do doutorado, essa divulgação foi de certa forma buscada, mas de maneira mais focada no desenvolvimento do doutorado e restrita a eventos científicos (exemplos: seminários internos do Labogeo, apresentação de trabalho no congresso internacional Geohab 2021, palestra no ConECOon 2021 - Congresso de Ecologia online, apresentação oral de trabalho no Backscatter Working group workshop em 2022, apresentação oral de trabalho no congresso internacional EGU 2022, apresentação de trabalho no Simpósio brasileiro de geologia e geofísica em 2022, apresentação de trabalho oral no Benthic Ecosystem Mapping & Engagement Workshop em 2023, apresentação oral de trabalho no congresso internacional Geohab 2023). Além disso, certamente a presença de dados de backscatter em um repositório de dados nacional acessível e unificado seria de grande importância para tornar a pesquisa e o uso não científico desse tipo de dado mais comum, além de que contribuiria com múltiplos propósitos e auxiliaria a tomada de decisão em várias esferas. Contudo, a discussão acerca de bancos e repositórios de dados é algo mais complexo e que não cabe no escopo desse tópico.

REFERÊNCIAS

- Brown, C. J.; Smith, S. J.; Lawton, P.; Anderson, J. T. Benthic Habitat Mapping: A Review of Progress towards Improved Understanding of the Spatial Ecology of the Seafloor Using Acoustic Techniques. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 2011, 92 (3), 502–520. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.02.007>.
- Brown, Craig, Jonathan Beaudoin, Mike Brissette, e Vicki Gazzola. 2019. “Multispectral Multibeam Echo Sounder Backscatter as a Tool for Improved Seafloor Characterization”. *Geosciences* 9 (3): 126. <https://doi.org/10.3390/geosciences9030126>.
- Buhl-Mortensen, Lene, Hanne Hodnesdal, e Terje Thorsnes, orgs. 2015. *The Norwegian Sea Floor: New Knowledge from MAREANO for Ecosystem-Based Management*. 1. edition. Norway. MAREANO.
- Buhl-Mortensen, Lene, Pål Buhl-Mortensen, Margaret F. J. Dolan, e Børge Holte. 2015. “The MAREANO Programme – A Full Coverage Mapping of the Norwegian off-Shore Benthic Environment and Fauna”. *Marine Biology Research* 11 (1): 4–17. <https://doi.org/10.1080/17451000.2014.952312>.
- Buscombe, Daniel, e Paul Grams. 2018. “Probabilistic Substrate Classification with Multispectral Acoustic Backscatter: A Comparison of Discriminative and Generative Models”. *Geosciences* 8 (11): 395. <https://doi.org/10.3390/geosciences8110395>.

- Costa, Bryan. 2019. “Multispectral Acoustic Backscatter: How Useful Is it for Marine Habitat Mapping and Management?” *Journal of Coastal Research* 35 (5): 1062. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-18-00103.1>.
- Dolan, Margaret, Reidulv Bøe, e Lilja Rún Bjarnadóttir. 2022. “Delivering seabed geodiversity information through multidisciplinary mapping initiatives: experiences from Norway”. *GEUS Bulletin* 52 (dezembro). <https://doi.org/10.34194/geusb.v52.8325>.
- Feldens, Peter, Inken Schulze, Svenja Papenmeier, Mischa Schönke, e Jens Schneider Von Deimling. 2018. “Improved Interpretation of Marine Sedimentary Environments Using Multi-Frequency Multibeam Backscatter Data”. *Geosciences* 8 (6): 214. <https://doi.org/10.3390/geosciences8060214>.
- Gaida, Timo, Tengku Tengku Ali, Mirjam Snellen, Alireza Amiri-Simkooei, Thaiënne van Dijk, e Dick Simons. 2018. “A Multispectral Bayesian Classification Method for Increased Acoustic Discrimination of Seabed Sediments Using Multi-Frequency Multibeam Backscatter Data”. *Geosciences* 8 (12): 455. <https://doi.org/10.3390/geosciences8120455>.
- Galvez, D.S., Papenmeier, S., Sander, L. et al. Ensemble mapping as an alternative to baseline seafloor sediment mapping and monitoring. *Geo-Mar Lett* 42, 11 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00367-022-00734-x>
- Harris, Peter T.; Baker, Elaine K. 2020. *Seafloor Geomorphology as Benthic Habitat: GeoHAB Atlas of Seafloor Geomorphic Features and Benthic Habitats*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier.
- Hughes Clarke, J.E. 2015. Multispectral Acoustic Backscatter from Multibeam, Improved Classification Potential. In Proceedings of the US Hydrographic Conference, National Harbor, MI, USA, p. 18
- Janowski, Lukasz, Karolina Trzcinska, Jaroslaw Tegowski, Aleksandra Kruss, Maria Rucinska-Zjadacz, e Pawel Pocwiardowski. 2018. “Nearshore Benthic Habitat Mapping Based on Multi-Frequency, Multibeam Echosounder Data Using a Combined Object-Based Approach: A Case Study from the Rowy Site in the Southern Baltic Sea”. *Remote Sensing* 10 (12): 1983. <https://doi.org/10.3390/rs10121983>.
- Lacharité, Myriam, Craig J. Brown, e Vicki Gazzola. 2018. “Multisource Multibeam Backscatter Data: Developing a Strategy for the Production of Benthic Habitat Maps Using Semi-Automated Seafloor Classification Methods”. *Marine Geophysical Research* 39 (1–2): 307–22. <https://doi.org/10.1007/s11001-017-9331-6>.
- Le Bas, T. P. & Huvenne, V. A. I. Acquisition and processing of backscatter data for habitat mapping – Comparison of multibeam and sidescan systems. *Applied Acoustics* 70, 1248–1257 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2008.07.010>
- McKinney, C. M.; Anderson, C. D. Measurements of Backscattering of Sound from the Ocean Bottom. *The Journal of the Acoustical Society of America* 1964, 36 (1), 158–163. <https://doi.org/10.1121/1.1918927>.
- Menandro, Pedro S., Alex C. Bastos, Benjamin Misiuk, e Craig J. Brown. 2022. “Applying a Multi-Method Framework to Analyze the Multispectral Acoustic Response of the Seafloor”. *Frontiers in Remote Sensing* 3 (março): 860282. <https://doi.org/10.3389/frsen.2022.860282>.
- Menandro, Pedro S., Ana Carolina Lavagnino, Fernanda V. Vieira, Geandré C. Boni, Tarcila Franco, e Alex C. Bastos. 2022. “The role of benthic habitat mapping for science and managers: A multi-design approach in the Southeast Brazilian Shelf after a major man-induced disaster”. *Frontiers in Marine Science* 9 (outubro): 1004083. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1004083>.
- Misiuk, Benjamin, Craig J. Brown, Katleen Robert, e Myriam Lacharité. 2020. “Harmonizing Multi-Source Sonar Backscatter Datasets for Seabed Mapping Using Bulk Shift Approaches”. *Remote Sensing* 12 (4): 601. <https://doi.org/10.3390/rs12040601>.
- Moura, R. L. et al. Spatial patterns of benthic megahabitats and conservation planning in the Abrolhos Bank. *Continental Shelf Research* 70, 109–117 (2013).
- Nafe, J. E.; Drake, C. L. Physical Properties of Marine Sediments. Tech. Rep., TR-2 1961, 3, 45.
- Schrodt, Franziska, Joseph J. Bailey, W. Daniel Kissling, Kenneth F. Rijdsdijk, Arie C. Seijmonsbergen, Derk van Ree, Jan Hjort, et al. 2019. “To Advance Sustainable Stewardship, We Must Document Not Only Biodiversity but Geodiversity”. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116 (33): 16155–58. <https://doi.org/10.1073/pnas.1911799116>.

- Schulze, Inken, Mayya Gogina, Mischa Schönke, Michael L. Zettler, e Peter Feldens. 2022. "Seasonal change of multifrequency backscatter in three Baltic Sea habitats". *Frontiers in Remote Sensing* 3 (agosto): 956994. <https://doi.org/10.3389/frsen.2022.956994>.
- Sperle, Marcelo, Negri, E., Ternes, C. "Automatic classification of sidescan sonar images for mapping marine mineral resources," *2015 IEEE/OES Acoustics in Underwater Geosciences Symposium (RIO Acoustics)*, Rio de Janeiro, Brazil, 2015, pp. 1-5, doi: 10.1109/RIOAcoustics.2015.7473620.
- Trzcinska, Karolina, Lukasz Janowski, Jaroslaw Nowak, Maria Rucinska-Zjadacz, Aleksandra Kruss, Jens Schneider von Deimling, Pawel Pocwiardowski, e Jaroslaw Tegowski. 2020. "Spectral Features of Dual-Frequency Multibeam Echosounder Data for Benthic Habitat Mapping". *Marine Geology* 427 (setembro): 106239. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2020.106239>.
- Vieira, F. V. et al. Along-shelf changes in mixed carbonate-siliciclastic sedimentation patterns. *Continental Shelf Research* 187, 103964 (2019).