



**MARINHA DO BRASIL**

**INSTITUTO DE ESTUDOS DO MAR ALMIRANTE PAULO MOREIRA  
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE**

**PROGRAMA ASSOCIADO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA  
MARINHA**

**ALEXANDRE DOUGLAS PARO**

**DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE SINAIS BIOACÚSTICOS DE  
CETÁCEOS ODONTOCETOS NA BACIA DE SANTOS**

**ARRAIAL DO CABO / RJ  
2025**



**MARINHA DO BRASIL**

**INSTITUTO DE ESTUDOS DO MAR ALMIRANTE PAULO MOREIRA  
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE**

**PROGRAMA ASSOCIADO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA  
MARINHA**

**ALEXANDRE DOUGLAS PARO**

**DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE SINAIS BIOACÚSTICOS DE  
CETÁCEOS ODONTOCETOS NA BACIA DE SANTOS**

Tese de doutorado apresentado ao Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira e à Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor em Biotecnologia Marinha.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Coutinho

**ARRAIAL DO CABO / RJ**

**2025**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Biblioteca do IEAPM

P257d Paro, Alexandre Douglas

Detecção e classificação de sinais bioacústicos de cetáceos odontocetos na Bacia de Santos / [por] Alexandre Douglas Paro.-- Arraial do Cabo, RJ: IEAPM, 2025.

92 f.: il.; 30 cm.

Tese (Doutorado em Biotecnologia Marinha) - Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira e Universidade Federal Fluminense - Associado de Pós-Graduação em Biotecnologia Marinha, Arraial do Cabo, 2025.

1. Bioacústica. 2. Monitoramento acústico passivo.  
3. Cetáceos. I. Coutinho, Ricardo. II. Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira. III. Universidade Federal Fluminense. IV. Titulo.

CDD: Ed. 22 -- 660.6

**ALEXANDRE DOUGLAS PARO**

**DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE SINAIS BIOACÚSTICOS DE CETÁCEOS  
ODONTOCETOS NA BACIA DE SANTOS**

Tese de doutorado apresentada ao Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira e à Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor em Biotecnologia Marinha

**COMISSÃO JULGADORA:**

---

Prof. Dr. Ricardo Coutinho  
Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira  
Professor orientador - Presidente da Banca Examinadora

---

Prof. Dr. Eduardo Barros Fagundes Netto  
Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira

---

Prof. Dr. Alexandre Azevedo  
Universidade Estadual do Rio de Janeiro

---

Dra. Maíra Laeta  
Universidade de São Paulo

---

Prof. Dr. Fábio Contrera Xavier  
Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira

---

Prof. Dr. Leandro Calado  
Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira

---

Dr. Tiago Fernandes Tavares  
INSPER - Instituto de Ensino e Pesquisa

---

**Arraial do Cabo/RJ, 23 de julho de 2025.**

A todos que dedicam suas vidas à  
proteção do meio ambiente,  
acreditam na força da ciência e  
mantêm viva a esperança.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus orientadores, Prof. Dr. Ricardo Coutinho, por ter acreditado em mim desde o início e ter aberto as portas do IEAPM para que pudéssemos desenvolver este trabalho. Obrigado professor pela confiança e os conselhos ao longo dessa jornada! Agradeço muito também a Profa. Dra. Julie Oswald, por ter me recebido na Universidade de Saint Andrews durante o programa de doutorado sanduíche na Escócia. Sem dúvida as suas colaborações e discussões foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a todos os amigos e colegas do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, em especial a Daniel Campbell (*in memoriam*) que me acolheu tão bem em Arraial do Cabo e tenho certeza que, assim como eu, todos que conviveram com ele sentem muito a sua falta. Meus agradecimentos ao fantástico grupo de bioacústica do IEAPM, Fábio Contrera, Ubirajara Melo-Junior, Murillo Minello, Aléxia Lessa, Viviane Barroso, Sâmia Araújo, Yagho Ramos, Sidney Gomes e Lilian Hoffman; que tornaram a jornada mais prazerosa e juntos enfrentamos os tempos de pandemia discutindo ciência com trocas de experiência e conhecimento. Também agradeço a Rafael Menezes, oceanógrafo e habilidoso programador de Python pelo suporte e Vinícius Reveilleau, amigo da pós de Acústica Submarina, que se somou a este seleto grupo. Aos professores do IEAPM, Jean Valentin, Lohegrin, Leandro Calado, Giselle Farias, Carla Veiga, Louisi Oliveira, Edu Fagundes Netto e Cadu Ferreira, com quem aprendi bastante nas disciplinas ministradas. Também agradeço ao Fábio, Rafael e Kassuga pelos cursos de programação do Clube do Cientista.

Agradeço muito pelo privilégio de fazer parte da equipe do Projeto de Monitoramento de Cetáceos da Bacia de Santos (PMC-BS). Este trabalho nem se quer teria existido sem o esforço e dedicação de um a equipe gigantesca de profissionais que fazem este projeto acontecer. A lista é grande e não vai caber aqui, agradeço toda a rede de biólogos e oceanógrafos que dedicaram semanas ou até mesmo meses interruptos em alto mar coletando dados dos cetáceos, de maneira muito profissional e ao mesmo tempo descontraída. Obrigado Leonardo Wedekin, Clarêncio “Barata”, Dênis Hille, “Sergião” do IBJ, Davis “Russo”, Matheus Caiaffa e Guto Costa, vocês são parceiros de verdade! Obrigado aos operadores de MAP, Daiane Anzolin, Juliana Moron, Leonardo Versiani, Kássia Moraes, Carol Dias, Clara Pires, Natacha Zimmermann, Bianca Perez, Gabriel Teixeira e muitos outros que

passaram pelo PMC-BS e mostraram muita vontade e dedicação. Não posso deixar de agradecer os marinheiros da embarcação Sea Route, todos muito parceiros e acolhedores, tornando o trabalho embarcado ainda mais prazeroso. Em especial ao mestre Fábio que sempre conduziu os cruzeiros com muita segurança e responsabilidade, com muitas histórias memoráveis e risadas também!

Agradeço a equipe do IBAMA e PETROBRAS responsável pelo PMC-BS, que abriram o caminho para que os esforços de conservação de mamíferos marinhos no Brasil desse um grande salto, assim como a empresa Socioambiental Consultores Associados pela execução deste projeto tão desafiador.

Meu profundo agradecimento a Tom Norris (*in memorian*), que nos auxiliou no fornecimento dos equipamentos de acústica e transferiu conhecimento técnico logo no início deste trabalho. Sua participação foi fundamental e faz muita falta, não só para mim, mas tenho certeza que também para todos que tiveram a oportunidade de trabalhar com ele. Agradeço muito também a equipe que trabalhava com o Tom, em especial Elizabeth Ferguson, Anne Simones, Shannon Coates e Corey Hom-Weaver. Aproveito para também agradecer a meu parceiro Manuel Caldas, engenheiro habilidoso, que me ensinou acústica submarina na teoria e na prática.

Agradeço a CAPES pela bolsa concedida em parte do doutorado e ao CNPq pela oportunidade de estudar um período do doutorado em St. Andrews, através de um bolsa sanduíche, onde também fiz amigos e conheci profissionais altamente qualificados.

Por último agradeço a todos amigos do meu círculo pessoal, vocês sabem quem são! Agradeço minha mãe Zélia Maria Paro, certamente eu não teria chegado até aqui sem seu suporte. Obrigado por esta conquista!

## RESUMO

O Monitoramento Acústico Passivo (MAP) tem se mostrado uma ferramenta eficaz para o estudo da ecologia dos ambientes marinhos. Os sons biológicos têm papel importante em processos vitais de organismos marinhos, tal como a sobrevivência e a reprodução. Entre os vertebrados, os mamíferos marinhos se destacam por seus repertórios acústicos ricos e diversificados. Nas últimas décadas os avanços tecnológicos possibilitaram o uso de uma ampla variedade de equipamentos e plataformas capazes de coletar dados bioacústicos em grandes escalas espaciais e temporais, viabilizando a utilização do MAP como uma ferramenta de gestão ambiental. Essa abordagem oferece inúmeras vantagens; no entanto, ainda existem lacunas a serem superadas para sua plena aplicação, como o aprofundamento do conhecimento sobre o repertório acústico das espécies e o desenvolvimento de classificadores robustos. Neste estudo, foram desenvolvidos classificadores para diferentes vocalizações de cetáceos (odontocetos) na Bacia de Santos, utilizando um banco de dados de referência coletado pelo Projeto de Monitoramento de Cetáceos da Bacia de Santos/Petrobras. Um conjunto de classificadores baseados em aprendizado de máquina foi treinado e validado com dados de assovios de sete espécies de golfinhos (Odontoceti: Delphinidae), alcançando uma acurácia global balanceada de 80%. Apesar dos resultados promissores, a variação intraespecífica impediu um bom desempenho para algumas espécies. Utilizando a mesma abordagem, foi desenvolvido um classificador de cliques de ecolocalização, com desempenho inferior ao dos assovios, sugerindo que os assovios carregam mais informações espécie-específicas. Ainda assim, o classificador de cliques se mostrou relevante, pois permite a inclusão de espécies com poucos registros de assovios. No total, foram incluídas nove espécies de golfinhos, entre as quais duas não estavam representadas no conjunto de dados de assovios, mas ainda assim demonstraram bom desempenho. Modelos combinados, integrando os resultados dos assovios e dos cliques, também foram testados, alcançando uma acurácia global balanceada de 76%. Essa abordagem demonstrou ser uma alternativa robusta para a identificação de espécies, mesmo em situações em que apenas cliques ou assovios estejam disponíveis, ampliando, assim, a aplicabilidade prática da metodologia proposta. Foi proposto um sistema de classificação baseado em múltiplos modelos por meio da agregação ponderada das probabilidades de seis classificadores base (assovios, cliques e modelos combinados) para a predição de novos dados. Além disso, foram testados detectores e classificadores automáticos de cliques de outras espécies de odontocetos encontrados na Bacia de Santos, incluindo membros das famílias Physeteridae (cachalote), Kogiidae (cachalote-anão), Ziphiidae (baleias-bicudas) e Pontoporiidae (toninha). As características acústicas dos cliques foram analisadas e comparadas com as descrições da literatura, levando em conta a distribuição geográfica conhecida de espécies no Atlântico Sul Ocidental, a fim de classificar os cliques no menor nível taxonômico possível. A identificação de sons biológicos é uma contribuição importante para a pesquisa científica, com aplicações no monitoramento e na conservação da biodiversidade marinha. O classificador acústico desenvolvido neste estudo representa um avanço significativo nesse contexto, oferecendo aplicações práticas para o monitoramento acústico passivo de mamíferos marinhos.

**Palavras-chave:** bioacústica; monitoramento acústico passivo, cetáceos; assovios; cliques de ecolocalização; classificador de espécies.

## ABSTRACT

Passive Acoustic Monitoring (PAM) has proven to be an effective tool for studying the ecology of marine environments. Biological sounds play a vital role in processes such as survival and reproduction of marine organisms. Among vertebrates, marine mammals are particularly notable for their rich and diverse acoustic repertoires. Advances in technology over recent decades have enabled the deployment of a wide array of equipment and platforms capable of collecting bioacoustic data on broad spatial and temporal scales, supporting the implementation of PAM as a tool for environmental management. This approach offers numerous advantages; however, certain challenges remain, particularly regarding the need for more comprehensive knowledge of species-specific acoustic repertoires and the development of robust classification models. In this study, classifiers were developed for different vocalizations of cetaceans (odontocetes) in the Santos Basin, using a reference dataset collected by the Santos Basin Cetacean Monitoring Project/Petrobras. A set of machine learning-based classifiers were trained and validated using whistle data from seven dolphin species (Odontoceti: Delphinidae), achieving an overall balanced accuracy of 80%. Despite these encouraging results, interspecific variability suggests that behavioral factors may influence acoustic patterns. Using the same methodological framework, a classifier was also developed for echolocation clicks. This classifier exhibited lower performance compared to whistle-based models, suggesting that whistles may encode more species-specific information. Nevertheless, the click classifier remains relevant, as it enables the inclusion of species with limited whistle recordings. It included nine dolphin species in total, among which two were not represented in the whistle dataset and still demonstrated good performance. Combined models integrating results from both whistles and clicks were also tested, achieving a balanced overall accuracy of 76%. This approach demonstrated to be a robust alternative for species identification, even in situations where only clicks or whistles are available, thus broadening the practical applicability of the proposed methodology. A multi-model classification system was also proposed, integrating the weighted probabilities from six base classifiers (whistles, clicks, and combined models) to support the classification of novel acoustic data. Furthermore, automatic click detectors and classifiers were tested for other odontocete species found in the Santos Basin, including members of Physeteridae (sperm whale), Kogiidae (pygmy sperm whale), Ziphiidae (beaked whales), and Pontoporiidae (franciscana). The acoustic features of their clicks were analyzed and compared with existing literature and known geographic distributions to support taxonomic identification at the finest possible resolution. The identification of biological sounds is an important contribution to scientific research, with valuable applications in the monitoring and conservation of marine biodiversity. The acoustic classifier developed in this study represents a significant advancement in this context, offering practical applications for the passive acoustic monitoring of marine mammals.

**Key-words:** bioacoustics; passive acoustic monitoring; cetaceans; whistles; echolocation clicks; species classifier.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1.1** - Espectrogramas ilustrando variações de assovios utilizados por delfinídeos na comunicação entre os indivíduos. No exemplo assovios do golfinho-comum (*Delphinus delphis*). Espectrograma com resolução de frequência de 93,7 Hz, resolução de tempo de 5,3 ms e janela Hann..... 23
- Figura 1.2** - Forma da onda ilustrando uma sequência de cliques de ecolocalização de forrageio de um odontoceto. No exemplo, os cliques diminuem o intervalo progressivamente até culminar na fase terminal ou “buzz”, quando ocorre o rastreamento fino e possível captura da presa ..... 23
- Figura 3.1** - Mapa com os limites da área amostrada pelo Projeto de Monitoramento de Cetáceos de Bacia de Santos (PMC-BS)..... 31
- Figura 3.2** - Embarcação “Sea Route” nas campanhas de AEMAP do PMC-BS (esquerda) e detalhe da torre de avistagem utilizada pelos observadores na varredura de cetáceos (direita) ..... 32
- Figura 3.3** - Equipamentos de MAP. Cabo de reboque eletromecânico e o arranjo de hidrofones no convés da embarcação (superior esquerda). Guincho hidráulico para lançamento do conjunto de cabo e hidrofones (superior direita). Estação de MAP com operadores realizando o monitoramento em tempo real (inferior esquerda). Detalhe do cabo rebocado a partir da popa da embarcação (inferior direita)..... 34
- Figura 3.4** - Interface gráfica dos softwares utilizados no monitoramento acústico passivo para deteções de cetáceos em tempo real. No canto superior esquerdo, o software Ishmael exibe um espectrograma com uma deteção de assvio. No canto inferior esquerdo, o Whaltrak 2.6 apresenta o mapa com a plotagem dos ângulos. À direita, o PamGuard mostra, na parte superior, a interface do detector de cliques e, na inferior, o mapa com os ângulos correspondentes..... 36
- Figura 3.5** - Exemplos dos quatro tipos de cliques de ecolocalização de diferentes grupos de odontocetos encontrados na Bacia de Santos. (a) Cliques de banda larga típicos de delfinídeos, (b) cliques de alta frequênci e banda estreita encontrada em diferentes grupos de espécies, incluindo os kogídeos (c) clique de frequênci modulada típico de baleias-bicudas (zifídeos) (d) cliques do cachalote centrado em frequênci mais baixas (cerca de 15 kHz). Os gráficos são do detector de cliques do programa PAMGuard. Da esquerda para direita, representam o gráfico da forma da onda, espectro de frequênci e o gráfico de Wigner que auxiliam na identificação de cada tipo. Ao lado, uma figura de uma espécie de odontoceto representante de cada grupo, de acordo com o tipo do clique (a) golfinho-rotador (*Stenella longirostris*), (b) cachalote-pigmeu (*Kogia breviceps*), (c) baleia-bicuda-de-Cuvier (*Ziphius cavirostris*) e (d) cachalote (*Physeter macrocephalus*)..... 38
- Figura 4.1** - Exemplo da extração do contorno de um assvio no módulo ROCCA do PAMGuard ..... 44
- Figura 4.2** - Fotos ilustrando as sete espécies de delfinídeos incluídas no classificador acústico de assovios da Bacia de Santos. (a) *Delphinus delphis*, (b) *Stenella attenuata*, (c) *Steno bredanensis*, (d) *Stenella clymene*, (e) *Stenella frontalis*, (f) *Stenella longirostris*, (g) *Tursiops truncatus*. Créditos: PMC-BS/Petrobras ..... 45
- Figura 4.3** - Estrutura do meta-classificador. As predições geradas pelos classificadores de base são os dados de entrada (meta-variáveis) que combinadas irão alimentar o meta-classificador ..... 51
- Figura 4.4** - Importânci global das variáveis para o classificador de assovios de delfinídeos da Bacia de Santos pelo método de permutação (siglas e descrição das variáveis no APÊNDICE A) ..... 59

**Figura 4.5** - Importância das variáveis por espécie para o classificador de assovios de delfinídeos da Bacia de Santos, calculado a partir de valores SHAP (algoritmo TreeSHAP). Escala de cores e valores na matriz indicam a posição das variáveis no ranqueamento entre as espécies (siglas e descrição das variáveis no APÊNDICE A).....60

**Figura 4.6** - Box-plot da distribuição das variáveis acústicas: Frequência máxima (FREQMAX), Inclinação média absoluta do contorno (FREQABSSLOPEMEAN), Frequência mediana (FREQMEDIAN) e Duração (DURATION) dos assovios para as sete espécies de delfinídeos. Estas variáveis estão entre as 10 melhores ranqueadas em termos de importância para o modelo do classificador. A barra branca no box-plot representa a mediana. Os “outliers” foram excluídos do gráfico para melhor visualização da distribuição central .....60

**Figura 4.7** - Importância global das meta-variáveis para o meta-classificador de assovios de delfinídeos da Bacia de Santos pelo método de permutação. Siglas se referem as meta-variáveis de probabilidade de distribuição de cada espécie obtidos dos modelos de base LOGO grupo, LOGO ind e k-fold .....63

**Figura 4.8** - Importância das meta-variáveis por espécie para o meta-classificador de assovios de delfinídeos da Bacia de Santos, calculado a partir de valores SHAP (algoritmo TreeSHAP). Escala de cores e valores na matriz indicam a posição das meta-variáveis no ranqueamento entre as espécies. As meta-variáveis correspondem a distribuição de probabilidades dos modelos de base (k-fold, LOGO individual e LOGO grupo).....63

**Figura 4.9** - Comparação das matrizes de confusão dos modelos de floresta aleatória para classificação de grupos de sete espécies de delfinídeos na Bacia de Santos. Acima o classificador de base LOGO grupo e abaixo o meta-classificador LOGO meta, gerado a partir dos resultados de três classificadores de base, k-fold, LOGO ind e LOGO grupo previamente treinados (ver texto). Os testes são feitos separando um grupo dos demais, os dados treinados em amostras balanceadas entre a espécies e o grupo deixado de fora testado. O processo é repetido até que todos os grupos sejam testados. A classificação de grupos contabiliza todas árvores do conjunto de assovios pertencente a cada grupo e gera uma única distribuição de probabilidades para a classificação. Na diagonal da matriz estão os valores das taxas de acerto (acurácia) para cada uma das sete espécies.....65

**Figura 4.10** - Proporção de eventos acústicos (grupos) corretamente classificados em função do número de assovios para diferentes espécies de delfinídeos da Bacia de Santos (validação LOGO grupo). A área sombreada em cinza representa o erro padrão entre cinco rodadas do modelo e em azul o desvio padrão de 100 repetições de amostras aleatórias por evento. O gráfico em escada com os degraus em cinza claro representa o número de eventos acústicos (número de grupos no eixo y a direita) em relação ao número de assovios (eixo x). No último gráfico mais abaixo a direita o resultado do meta-classificador para *T.truncatus* (Meta-Class).....67

**Figura 4.11** - Fluxograma que define as regras finais de predição através da integração de modelos de classificadores de assovios para sete espécies de delfinídeos da Bacia de Santos. A predição é feita comparando-se as predições do classificador de base LOGO grupo e o meta-classificador LOGO meta. ....77

**Figura 5.1** - Detector de cliques do PAMGuard com aplicação do módulo detector de cadeias (“Click Train Detector”). As cores representam as cadeias de cliques detectadas, no eixo x o tempo (escala de 5 minutos) e no eixo y os ângulos de direção entre 0 e 180 graus. Neste exemplo trecho com detecção de cliques do golfinho-de-dentes-rugosos (*Steno bredanensis*) conforme identificação visual durante a detecção .....86

**Figura 5.2** - Fotos ilustrando duas das espécies de delfinídeos incluídas no classificador de cliques (a) baleia-piloto (*Globicephala* sp.) e (b) golfinho-de-risso (*Grampus griseus*). Créditos: PMC-BS/Petrobras.....**88**

**Figura 5.3** - Matrizes de confusão dos modelos de floresta aleatória utilizando cliques de ecolocalização para classificação de eventos acústicos de delfinídeos na Bacia de Santos. Acima o modelo de classificador com sete espécies e abaixo o modelo com nove espécies. Na diagonal da matriz estão os valores das taxas de acerto (acurácia) para cada uma das espécies. A classificação dos eventos foi feita a partir da estratégia de “deixar-um-grupo-de-fora” (LOGO grupo). Os testes são feitos separando um evento dos demais e o restante é utilizado para o treinamento a partir de uma amostra balanceada. O processo é repetido até que todos os eventos sejam testados.....**98**

**Figura 5.4**- Importância global das variáveis para o classificador de cliques de delfinídeos da Bacia de Santos pelo método de permutação (siglas e descrição das variáveis no Apêndice C).....**99**

**Figura 5.5** - Importância das variáveis por espécie para o classificador de cliques de delfinídeos da Bacia de Santos, calculado a partir de valores SHAP (algoritmo TreeSHAP). Escala de cores e valores na matriz indicam a posição das variáveis no ranqueamento entre as espécies (siglas e descrição das variáveis no Apêndice C).....**100**

**Figura 6.1** - Espécies representativas das quatro famílias de odontocetos analisadas quanto à detecção e classificação automática de cliques de ecolocalização: (a) Physeteridae: cachalote (*Physeter macrocephalus*), (b) Ziphiidae: baleia-bicuda-de-Gervais (*Mesoplodon europaeus*), (c) Kogiidae: cachalote-pigmeu (*Kogia breviceps*) e (d) Pontoporiidae: (*Pontoporia blainvilleyi*) Créditos: www.noyocenter.org, www.wdg.com, www.oriokohegaztiak.com e toninhasdobrasil.com.br.....**125**

**Figura 6.2** - Exemplos de cliques de ecolocalização das três famílias de cetáceos odontocetos analisadas, ilustrando a forma da onda (figura da esquerda) e o espectrograma (figura da direita) (128-pt FFT, 500 kHz, Hann, 75% sobreposição) (a): Physeteridae, família composta por uma única espécie, o cachalote (*Physeter macrocephalus*), (b): Kogiidae, composta por duas espécies do gênero Kogia, no exemplo representada pelo cachalote-anão (*Kogia sima*) e (c): Ziphiidae, família composta por uma diversidade de espécies de baleias-bicudas (zifídeos).....**127**

**Figura 6.3** - Características dos cliques do cachalote (*Physeter macrocephalus*): (a) espectro médio do conjunto de cliques analisado (linha sólida); a linha pontilhada mostra o ruído médio, calculado a partir de uma amostra anterior a cada clique (512-pt FFT, 500 kHz, Hann) (b) histograma da frequência de pico, (c) espectrograma concatenado dos cliques em ordem crescente do valor de pico de frequência (512-pt FFT, 500 kHz, Hann, sem sobreposição) e (d) histograma do intervalo-entre-cliques.....**128**

**Figura 6.4** - Mapa da Bacia de Santos com a distribuição dos eventos acústicos atribuídos ao cachalote (*Physeter macrocephalus*). As cores na legenda indicam se houve ou não avistagem (Visual/Acústico ou Acústico), conforme a legenda. O tamanho dos pontos é proporcional ao número de cliques detectados por evento. As linhas batimétricas de 200 m e 2.000 m estão assinaladas no mapa.....**129**

**Figura 6.5** - Características dos cliques do cachalote-anão (*Kogia sima*): (a) espectro médio do conjunto de cliques analisado (linha sólida); a linha pontilhada mostra o ruído médio, calculado a partir de uma amostra anterior a cada clique (512-pt FFT, 500 kHz, Hann). A linha pontilhada em vermelho corresponde ao espectro médio dos eventos acústicos de *Kogia* ssp. analisados separadamente, (b) histograma da frequência de pico, (e) espectrograma concatenado dos cliques analisados em ordem crescente do valor de pico de frequência (512-pt FFT, 500 kHz, Hann, sem sobreposição) e (f) histograma do intervalo-entre-cliques.....**133**

**Figura 6.6** - Mapa da Bacia de Santos com a distribuição dos eventos acústicos atribuídos ao gênero *Kogia*. Dois eventos foram confirmados visualmente como do cachalote-anão (*Kogia sima*), conforme indicado na legenda. Os demais eventidos identificados como *Kogia* spp. não tiveram confirmação visual, com exceção de um registro visual confirmado apenas como *Kogia*, sem identificação da espécie, e, por isso, agrupado em *Kogia* spp. O tamanho dos pontos é proporcional ao número de cliques detectados por evento. As linhas batimétricas de 200 m e 2.000 m estão assinaladas no mapa ..... 133

**Figura 6.7** - Espectro médio de 11 eventos acústicos independentes de cliques de zifídeos (512-pt FFT, 500 kHz, Hann). Na legenda as cores indicam o tipo de evento acústico, de acordo com a classificação dos cliques de cada evento. Os tipos foram rotulados de acordo com a classificação do detector de cliques no PAMGuard, configurado para uma banda de teste entre 25-50 KHz (tipo MF) e uma outra entre 40-80 kHz (tipo HF). A sigla MF/HF indica que cliques de ambos os tipos foram detectados no evento. ..... 136

**Figura 6.8** - Características dos cliques de três eventos acústicos de zifídeos registrados na Bacia de Santos. À esquerda, a forma de onda de um clique individual representativo de cada evento; à direita, o espectro médio do conjunto de cliques (512-pt FFT, 500 kHz, Hann). A linha pontilhada mostra o espectro médio do ruído de uma amostra anterior a cada clique. Os eventos foram selecionados por representarem os diferentes tipos de cliques observados. Os tipos foram rotulados conforme a classificação atribuída pelo detector de cliques do PAMGuard, configurado com duas bandas de frequência: 25-50 kHz (tipo MF) e 40-80 kHz (tipo HF). A sigla MF/HF indica a detecção de cliques dos dois tipos em um mesmo evento..... 137

**Figura 6.9** - Características dos cliques de três eventos acústicos de zifídeos registrados na Bacia de Santos. No lado esquerdo: spectrograma de um clique individual (128-pt FFT, 500 kHz, Hann, 75% sobreposição), figura no centro: histograma da frequência de pico e à direita: histograma do intervalo-entre-cliques. Os eventos analisados foram selecionados para representar os tipos de cliques encontrados. Os tipos foram rotulados de acordo com a classificação do detector de cliques no PAMGuard, configurado para uma banda de teste entre 25-50 KHz (tipo MF) e uma outra entre 40-80 kHz (tipo HF). A sigla MF/HF indica que cliques de ambos os tipos foram detectados no mesmo evento. ..... 138

**Figura 6.10** - Mapa da Bacia de Santos com a distribuição dos eventos acústicos registrados para baleias-bicudas (família Ziphiidae). Nenhum desses registros teve confirmação visual. Cada evento é representado pelos tipos de cliques detectados (MF, MF/HF e HF), conforme a legenda. A classificação dos tipos foi baseada nos resultados do detector de cliques do PAMGuard, configurado para bandas de teste entre 25-50 kHz (tipo MF) e 40-80 kHz (tipo HF). As linhas batimétricas de 200 m e 2.000 m estão assinaladas no mapa..... 140

**Figura 6.11** - Características dos cliques da toninha (*Pontoporia blainvilliei*) na Bacia de Santos: (a) exemplo da forma da onda e (b) spectrograma de um clique (128-pt FFT, 500 kHz, Hann, 75% sobreposição), (c) espectro médio do conjunto de cliques analisados (linha sólida) e o ruido médio de uma amostra antes de cada clique (linha pontilhada) (512-pt FFT, 500 kHz, Hann), (d) histograma da frequência de pico, (e) spectrograma concatenado dos cliques em ordem crescente do valor de pico de frequência (512-pt FFT, 500 kHz, Hann, sem sobreposição) e (f) histograma do intervalo-entre-cliques..... 143

**Figura 6.12** - Mapa da Bacia de Santos com a distribuição dos eventos acústicos registrados para a toninha (*Pontoporia blainvilliei*). Nenhum desses registros teve confirmação visual. O ponto indicado com zero (0) na legenda representa um evento detectado em campo e posteriormente confirmado na análise. No entanto, todos os cliques associados ficaram abaixo do limiar de detecção (16 dB) adotado nas análises deste estudo..... 144

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 4.1</b> - Sumário do volume de dados acústicos das sete espécies de delfinídeos analisadas. Dados coletados durante 18 campanhas de amostragem visual e acústica do PMC-BS na Bacia de Santos e duas campanhas do PMC-Peregrino na Bacia de Campos. Os eventos acústicos são os registros independentes de grupos de golfinhos. Os assóvios selecionados correspondem ao total de amostras obtidas das gravações e os assóvios processados correspondem ao total utilizado no treinamento e teste de classificadores (limitado a 50 por evento).....	<b>53</b>
<b>Tabela 4.2</b> - Resultados da precisão, sensibilidade, F1-score, acurácia, acurácia global e acurácia global balanceada do classificador de assóvios para sete espécies de delfinídeos da Bacia de Santos. Os resultados são de diferentes estratégias de divisão dos dados e de classificação: k-fold ( $k=5$ ) sem separar os eventos (assóvios dos eventos presentes tanto nos dados de treino como de teste), LOGO (com agrupamento e validação cruzada por exclusão de um evento) com dois resultados: LOGO ind para o agregado dos assóvios individuais e LOGO grupo para a classificação de eventos acústicos. Os resultados da validação destas três estratégias foram os dados de entrada para um meta-classificador utilizado para a classificação de eventos (LOGO meta). Cada resultado representa a média de cinco execuções com dados de treinamento平衡ados e hiperparâmetros otimizados.....	<b>57</b>
<b>Tabela 5.1</b> - Sumário do volume de dados acústicos de cliques de ecolocalização de nove espécies de delfinídeos. Dados coletados durante 18 campanhas de amostragem visual e acústica do PMC-BS na Bacia de Santos e duas campanhas do PMC-Peregrino na Bacia de Campos. Os eventos acústicos são os registros independentes de grupos de golfinhos associados a um conjunto de cliques detectados. O número de cadeias de cliques corresponde ao total obtido pelo detector automático do PAMGuard (“Click Train Detector”). O número de cliques detectados corresponde ao total de amostras individuais obtidas pelo detector e os cliques processados o total utilizado no treinamento e validação de classificadores acústicos (limitado a 1.000 cliques por evento acústico).....	<b>93</b>
<b>Tabela 5.2</b> - Resultados da precisão, sensibilidade, F1-score, acurácia global e acurácia global balanceada do classificador de cliques de ecolocalização para os modelos com sete espécies (7sp) e nove espécies (9sp) de delfinídeos da Bacia de Santos utilizando modelos de floresta aleatória. Os resultados são do classificador LOGO (validação cruzada por exclusão de um evento) com dois resultados: LOGO ind para os cliques individuais e LOGO grupo para a classificação de eventos inteiros (eventos acústicos). Os resultados foram obtidos a partir da média de cinco execuções com variações na randomização dos dados balanceados e das árvores de decisão.....	<b>97</b>
<b>Tabela 5.3</b> Total de eventos acústicos usados nos três modelos combinando assóvios e cliques de delfinídeos da Bacia de Santos. AS/EC: eventos com assóvios e cliques; AS/EC ou AS: eventos com ambos ou apenas assóvios; Todos os eventos: todos os eventos disponíveis, independentemente do tipo de sinal. Espécies: Dd: <i>Delphinus delphis</i> , Gg: <i>Grampus griseus</i> , Gsp: <i>Globicephala</i> sp, Sa: <i>Stenella attenuata</i> , Sb: <i>Steno bredanensis</i> , Sc: <i>Stenella clymene</i> , Sf: <i>Stenella frontalis</i> , Sl: <i>Stenella longirostris</i> , Tt: <i>Tursiops truncatus</i> . Apenas as variáveis de cliques foram obtidas para as espécies <i>G.griseus</i> e <i>Globicephala</i> sp.....	<b>101</b>
<b>Tabela 5.4</b> - Resultados do classificador combinado de assóvios e cliques para sete espécies de delfinídeos na Bacia de Santos. A tabela apresenta a média da sensibilidade por espécie, com os respectivos desvios padrão entre parênteses, obtidos a partir de 10 execuções do modelo. Três conjuntos de dados foram testados, definidos pela presença de variáveis acústicas: (1) eventos contendo obrigatoriamente assóvios e cliques; (2) eventos com ambos ou apenas assóvios; e (3) todos os eventos disponíveis. Cada conjunto possui quatro variações, conforme a inclusão da variável meta Tt (meta-classificador de assóvios para <i>Tursiops truncatus</i> ) e das coordenadas geográficas (lat/long) como preditores. Os maiores valores de sensibilidade estão destacados em negrito.....	<b>103</b>

**Tabela 5.5** - Resultados do classificador combinado de assovios e cliques para sete espécies de delfinídeos na Bacia de Santos. A tabela apresenta a média da sensibilidade por espécie, com os respectivos desvios padrão entre parênteses, obtidos a partir de 10 execuções do modelo. Três conjuntos de dados foram testados, definidos pela presença de variáveis acústicas: (1) eventos contendo obrigatoriamente assovios e cliques; (2) eventos com ambos ou apenas assovios; e (3) todos os eventos disponíveis. Cada conjunto possui quatro variações, conforme a inclusão da variável meta Tt (meta-classificador de assovios para *Tursiops truncatus*) e das coordenadas geográficas (lat/long) como preditores. Os maiores valores de sensibilidade estão destacados em negrito..... **104**

**Tabela 5.6** - Modelos de classificadores aplicados para o teste de novos dados. Cada modelo gera uma distribuição de probabilidades para as espécies, e são atribuídos pesos específicos conforme o modelo e a espécie. A soma das probabilidades de cada espécie é multiplicada pelo respectivo peso, e o resultado é normalizado pela soma dos pesos ( $\Sigma$  peso) atribuídos à espécie. A espécie com o maior valor de probabilidade final será a previsão atribuída ao evento. Sigla dos modelos: AS (classificador de assovios), AS-M (meta-classificador de assovios), EC-7sp (cliques sete espécies), EC-9sp (cliques nove espécies), Com-7sp (combinado com sete espécies e eventos com variáveis completas), Com-9sp (combinado com nove espécies e eventos podem ter variáveis faltantes). Os modelos combinados incluem a variável de *T. truncatus* do meta-classificador e a inclusão de latitude e longitude do local do evento acústico como variável. Sigla das espécies: Dd (*Delphinus delphis*), Gg (*Grampus griseus*), Gsp. (*Globicephala sp.*), Sa (*Stenella attenuata*), Sb (*Steno bredanensis*), Sc (*Stenella clymene*), Sf (*Stenella frontalis*), Sl (*Stenella longirostris*), Tt (*Tursiops truncatus*)..... **106**

**Tabela 6.1** - Sumário de eventos acústicos atribuídos ao cachalote (*Physeter macrocephalus*). Os eventos listados representam grupos detectados por meio de cliques durante as atividades de campo do PMC-Bs\Petrobras. As colunas apresentam a data, profundidade no local da detecção, número de cliques analisados e a presença ou ausência de avistagem visual associada ao evento acústico..... **128**

**Tabela 6.2** - Sumário estatístico dos parâmetros acústicos dos cliques do cachalote (*Physeter macrocephalus*). O intervalo-entre-cliques tem n = 5.759, enquanto os demais parâmetros possuem n = 9.115. P10: percentil 10%; P90: percentil 90%..... **128**

**Tabela 6.3** - Sumário de eventos acústicos atribuídos a kogídeos (família Kogiidae). Os eventos listados representam grupos detectados por meio de cliques durante as atividades de campo do PMC-Bs\Petrobras. As colunas apresentam a data, profundidade no local da detecção, número de cliques analisados e a presença ou ausência de avistagem associada ao evento acústico. Os eventos assinalados com (\*) na tabela correspondem a registros com confirmação visual de cachalote-anão (*Kogia sima*), enquanto os demais foram classificados como *Kogia spp*..... **132**

**Tabela 6.4** - Sumário estatístico dos parâmetros acústicos dos cliques do cachalote-anão (*Kogia sima*). O intervalo-entre-cliques tem n = 2.434, enquanto os demais parâmetros possuem n = 2.705. P10: percentil 10%; P90: percentil 90%..... **132**

**Tabela 6.5** - Sumário de eventos acústicos atribuídos a zifídeos (família Ziphiidae). Os eventos listados representam grupos detectados por meio de cliques durante as atividades de campo do PMC-Bs\Petrobras. As colunas apresentam a data, a profundidade no local da detecção e o número de cliques analisados. Todos os registros foram exclusivamente acústicos, ou seja, sem observação ou identificação visual da espécie. A última coluna indica os tipos de cliques detectados em cada evento, classificados conforme o detector de cliques do PAMGuard, configurado para duas bandas de teste: 25-50 kHz (tipo MF) e 40-80 kHz (tipo HF). Na maioria dos eventos foram detectados cliques de ambos os tipos (MF/HF)..... **135**

**Tabela 6.6** - Sumário estatístico dos parâmetros acústicos dos cliques de zifídeos (Família Ziphiidae), apresentando a mediana, com os percentis de 10% e 90% indicados entre parênteses. São apresentados três eventos acústicos analisados de forma independente. Cada evento acústico está representado pelos tipos de cliques encontradas (MF, MF/HF e HF). Os tipos foram rotulados de acordo com a classificação do detector de cliques no PAMGuard, configurado para uma banda de teste entre 25-50 kHz (tipo MF) e uma outra entre 40-80 kHz (tipo HF). Na categoria MF/HF ambos os tipos foram encontrados no mesmo evento acústico. O n representa o número de amostras, com exceção do intervalo-entre-cliques em que o n foi MF = 11, MF/HF = 33 e HF = 40)..... **139**

**Tabela 6.7** - Sumário de eventos acústicos atribuídos a toninha (*Pontoporia blainvilliei*). Os eventos listados representam grupos detectados por meio de cliques durante as atividades de campo do PMC-BR\Petrobras. As colunas indicam a data, a profundidade no local da detecção e o número de cliques analisados. Todos os eventos foram exclusivamente acústicos, ou seja, não houve observação ou identificação visual da espécie. O evento assinalado com (\*) refere-se a um registro em que os cliques foram detectados em campo, porém ficaram abaixo do limiar de detecção (16 dB) definido neste estudo.....142

**Tabela 6.8** - Sumário estatístico dos parâmetros acústicos dos cliques da toninha (*Pontoporia blainvilliei*). O intervalo-entre-cliques tem n = 24, enquanto os demais parâmetros possuem n = 58. P10: percentil 10%; P90: percentil 90%.....142

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AEMAP	Campanhas de Avistagem Embarcada e Monitoramento Acústico Passivo do PMC-BS
BWBR	Tipo de clique de zifídeo não-identificado registrado na Bacia de Santos e descrito nesta tese (Beaked Whale Brazil)
CNN	Rede Neural Convolucional
FM	Frequência Modulada. Tipo de cliques de frequência modulada de zifídeos
HF	Cliques de frequência alta (configuração na banda entre 40 a 80 kHz para detecção e classificação automática de zifídeos)
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
k-fold	Validação cruzada em k subconjuntos, utilizada para avaliar o desempenho de modelos de classificação
LOGO	Leave-One-Group-Out: método de validação cruzada em que cada grupo de dados é utilizado uma vez para teste
LOGO ind	Classificação de amostras individuais de assovios obtida em cada iteração de teste
LOGO grupo	Classificação do grupo obtida de cada evento acústico testado
MAP	Monitoramento Acústico Passivo
MF	Cliques de frequência média (configuração na banda entre 25 a 50 kHz para detecção e classificação automática de zifídeos)
NBHF	Cliques de frequência alta e banda estreita

PMC-BS Projeto de Monitoramento de Cetáceos da Bacia de Santos

PMC-Per Projeto de Monitoramento de Cetáceos do Peregrino

ROCCA Real-time Odontocete Call Classification Algorithm (algoritmo  
do PAMGuard)

SHAP SHapley Additive exPlanations: método para avaliar a  
importância de variáveis em modelos preditivos

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>22</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>28</b>
2.1 OBJETIVO GERAL.....	28
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	28
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>29</b>
3.1 DADOS BIOACÚSTICOS DE CETÁCEOS .....	29
3.2 ÁREA DE ESTUDO.....	30
3.3 COLETA DE DADOS .....	31
3.3.1 Equipamentos de acústica .....	32
3.3.2 Detecção acústica de cetáceos em tempo real .....	34
3.3.3 Associação entre as detecções visuais e acústicas de cetáceos .....	36
3.4 CLASSIFICADORES ACÚSTICOS DE DELFINÍDEOS .....	39
3.4.1 Métricas de classificação .....	39
<b>4 CAPÍTULO 1 CLASSIFICADOR ACÚSTICO DE ASSOVIOS DE DELFINÍDEOS DA BACIA DE SANTOS .....</b>	<b>42</b>
<b>4.1 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>42</b>
4.1.1 Processamento de assovios .....	42
4.1.2 Treinamento e validação do classificador acústico de assovios de delfinídeos .....	44
4.1.3 Classificação dos eventos acústicos por número de assovios .....	51
<b>4.2 RESULTADOS .....</b>	<b>53</b>
4.2.1 Validação cruzada k-fold sem agrupamento de eventos acústicos .....	54
4.2.2 Validação cruzada LOGO com agrupamento de eventos acústicos .....	55
4.2.3 Importância das variáveis.....	58
4.2.4 Meta-Classificador de assovios.....	61
4.2.5 Importância das variáveis do meta-classificador .....	62
4.2.6 Matriz de confusão .....	64
4.2.7 Classificação dos eventos acústicos por número de assovios .....	66
<b>4.3 DISCUSSÃO .....</b>	<b>68</b>
<b>4.4 CONCLUSÕES .....</b>	<b>75</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>79</b>
<b>5 CAPÍTULO 2 INTEGRAÇÃO DE CLASSIFICADORES ACÚSTICOS DE ASSOVIO E CLIQUES DE DELFINÍDEOS DA BACIA DE SANTOS .....</b>	<b>83</b>

<b>5.1 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	83
5.1.1 Cliques de ecolocalização .....	83
5.1.2 Classificador acústico de cliques de delfinídeos .....	87
5.1.3 Classificador acústico combinado de assovios e cliques .....	89
5.1.4 Classificação ponderada de múltiplos modelos .....	91
<b>5.2 RESULTADOS .....</b>	93
5.2.1 Classificador acústico de cliques de delfinídeos .....	93
5.2.2 Classificador acústico combinado de assovios e cliques .....	100
5.2.3 Classificação ponderada de múltiplos modelos .....	105
<b>5.3 DISCUSSÃO .....</b>	107
5.3.1 Classificador acústico de cliques de delfinídeos .....	107
5.3.2 Classificador acústico combinado de assovios e cliques de delfinídeos .....	111
<b>5.4 CONCLUSÕES .....</b>	116
<b>REFÊRENCIAS.....</b>	118
<b>6 CAPÍTULO 3 DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE CLIQUES DE ECOLOCALIZAÇÃO DE ODONTOCETOS DAS FAMÍLIAS PHYSETERIDAE, KOGIIDAE, ZIPIIIDAE E PONTOPORIIDAE NA BACIA DE SANTOS .....</b>	122
<b>6.1 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	122
6.1.1 Cliques de odontocetos das famílias Physeteridae, Kogiidae, Zippiidae e Pontoporiidae .....	122
6.1.2 Detecção e classificação automática dos cliques de Physeteridae, Kogiidae, Zippiidae e Pontoporiidae .....	122
6.1.3 Caracterização dos cliques de odontocetos das famílias Physeteridae, Kogiidae, Zippiidae e Pontoporiidae .....	124
<b>6.2 RESULTADOS .....</b>	125
6.2.1 Família Physeteridae .....	125
6.2.2 Família Kogiidae .....	130
6.2.3 Família Zippiidae .....	134
6.2.4 Família Pontoporiidae .....	141
<b>6.3 DISCUSSÃO .....</b>	145
6.3.1 Physeteridae .....	145
6.3.2 Kogiidae .....	147
6.3.3 Zippiidae .....	149
6.3.4 Pontoporiidae .....	157
<b>6.4 CONCLUSÕES .....</b>	162
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	164
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	170
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	173
<b>APÊNDICE A – VARIÁVEIS DESCRIPTORAS DOS ASSOVIOS.....</b>	180

<b>APÊNDICE B – PRINCIPAIS PARÂMETROS ACÚSTICOS DOS ASSOVIOS DE ESPÉCIES DE GOLFINHOS DA BACIA DE SANTOS.....</b>	<b>181</b>
<b>APÊNDICE C – VARIÁVEIS DESCRIPTORAS DOS CLIQUES.....</b>	<b>182</b>
<b>APÊNDICE D – PRINCIPAIS PARÂMETROS ACÚSTICOS DOS CLIQUES DE ESPÉCIES DE GOLFINHOS DA BACIA DE SANTOS.....</b>	<b>183</b>

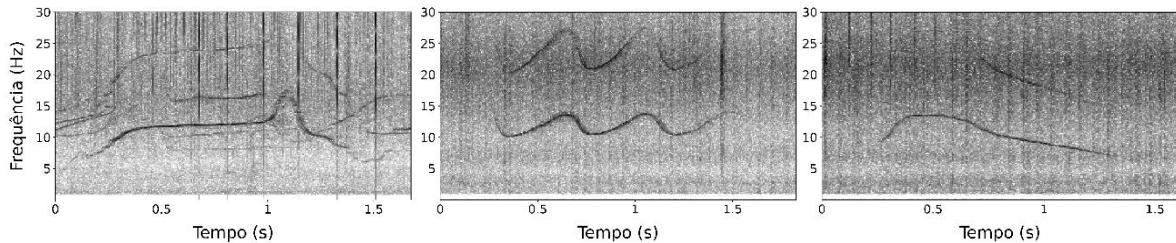
## 1 INTRODUÇÃO

A audição é um dos principais sentidos empregados na comunicação entre os organismos marinhos. O som se propaga de maneira muito mais eficiente no meio aquático do que qualquer outro fenômeno ondulatório, como por exemplo a luz (ondas eletromagnéticas). Enquanto as ondas sonoras tem a capacidade de se propagar por centenas de quilômetros (a depender da frequência e condições de propagação), a luz é absorvida em questão de dezenas a centenas de metros nos melhores casos (URICK, 1983). Evolutivamente, isto favoreceu diversas adaptações de organismos marinhos, como mecanismos de produção e recepção de sons e comportamentos intermediados por sinais bioacústicos (LADICH; WINKLER, 2017).

Os sons biológicos têm papel importante em diversas atividades dos seres vivos, influenciando, por exemplo, comportamentos de acasalamento, cuidado parental, coesão social, defesa de território, detecção de presas e alerta de predadores (TYACK, 1986; TYACK; CLARK, 2000; LADICH, 2019; TYACK; MILLER, 2002; MONTGOMERY; RADFORD, 2017; POPPER; HAWKINS, 2019). Entre os vertebrados marinhos, os mamíferos estão entre os principais grupos que produzem vocalizações e constituem um importante componente da paisagem acústica submarina (PUTLAND et al., 2017).

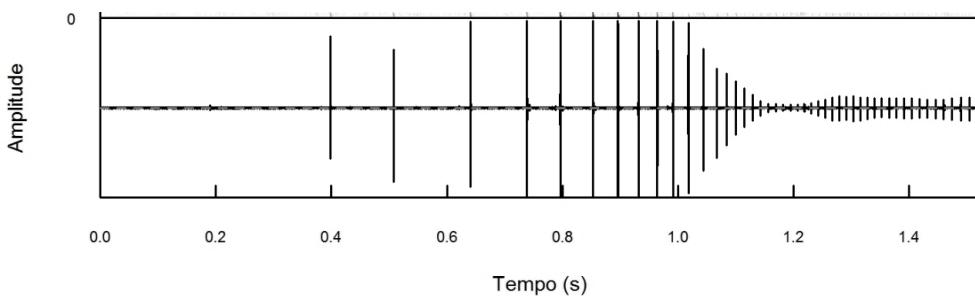
As espécies de cetáceos (ordem Artiodactyla), que tem entre seus representantes baleias, botos e golfinhos, apresentam um rico e variado repertório sonoro (TYACK; MILLER, 2002). Como são animais pelágicos, com habilidades sociais e cognitivas bem desenvolvidas, a audição evoluiu como um dos seus mais importantes sentidos (LADICH; WINKLER, 2017; TYACK, 2017). As vocalizações dos cetáceos incluem desde frequências infrassônicas (<20 Hz), como os grunhidos das baleias (misticetos) até frequências ultrassônicas (>150 kHz), como os cliques típicos de golfinhos e outros odontocetos (TYACK, 1986). Os sons de odontocetos se dividem em três tipos de acordo com suas características e funções - assobios, cliques de ecolocalização e sons pulsados. Os assobios (Figura 1.1) tem características tonais e frequência modulada, a maior parte na banda entre 5 kHz a 30 kHz (OSWALD et al, 2003). São utilizados principalmente por delfinídeos (família Delphinidae) e desempenham funções como coesão social dos grupos, coordenação de atividades, reconhecimento individual, identificação de parentesco e outros aspectos das relações

sociais entre os indivíduos (SMOLKER; MANN; SMUTS, 1993; TYACK; CLARK, 2000; TYACK, 2000; JANIK, 2009; JANIK; SAYIGH, 2013).



**Figura 1.1** - Espectrogramas ilustrando variações de assovios utilizados por delfinídeos na comunicação entre os indivíduos. No exemplo assovios do golfinho-comum (*Delphinus delphis*). Espectrograma com resolução de frequência de 93,7 Hz, resolução de tempo de 5,3 ms e janela Hann.

Os cliques de ecolocalização (Figura 1.2) são pulsos sonoros emitidos em sequências regulares e direcionados a objetos, cujos ecos refletidos são interpretados pelos animais para formar uma “imagem acústica” do ambiente. São utilizados primariamente para orientação, navegação e forrageio (AU, 1993; MADSEN; SURLYKKE, 2013). Durante o forrageio, os cliques produzidos num intervalo bem curto (“buzz”) indicam a fase de aproximação e captura das presas (MADSEN; SURLYKKE, 2013). A maior parte das espécies produzem cliques que abrangem o espectro ultrassônico, entre 20 kHz a mais de 150 kHz.



**Figura 1.2** - Forma da onda ilustrando uma sequência de cliques de ecolocalização de forrageio de um odontoceto. No exemplo, os cliques diminuem o intervalo progressivamente até culminar na fase terminal ou “buzz”, quando ocorre o rastreamento fino e possível captura da presa.

Outra categoria de sons de comunicação dos odontocetos são denominados de sons pulsados ou pulsados explosivos. São similares aos cliques de ecolocalização, mas o intervalo entre os pulsos é bem mais curto, o que faz soar como um som contínuo. Sugere-se que são sinais emotivos na comunicação mais próxima entre os indivíduos para intermediar desde comportamentos agonísticos, de

acasalamento e de alerta (LAMMERS et al., 2004; LAMMERS; SCHOTTEN; AU, 2006; BLOMQVIST; AMUNDIN, 2004). Alguns grupos de odontocetos produzem exclusivamente cliques. O cachalote (*Physeter macrocephalus*), por exemplo, realiza mergulhos de forrageio que variam de aproximadamente 500 metros até mais de 2.000 metros de profundidade, durante os quais produz cliques regularmente (MILLER; JOHNSON; TYACK, 2004; WATWOOD et al., 2006). Além disso, os cachalotes também produzem sequências de pulsos em contextos de socialização (MADSEN; WAHLBERG; MØHL, 2002; OLIVEIRA et al., 2013; JACOBS et al., 2024).

Outros grupos de odontocetos menos conhecidos, como o cachalote-pigmeu (*Kogia* sp.) e as baleias-bicudas (família Ziphidae) também fazem mergulhos nas zonas meso e batipelágicas e utilizam primariamente os cliques durante os mergulhos de forrageio (JOHNSON et al., 2004; TYACK et al., 2006; MALINKA et al, 2021). Esses grupos incluem espécies elusivas e de difícil observação em campo, pois, além de passarem longos períodos submersas, apresentam comportamento discreto na superfície. Nesses casos, o monitoramento acústico passivo (MAP) torna-se uma ferramenta complementar essencial, permitindo a coleta de dados que contribuem para a investigação de aspectos da biologia dessas espécies pouco conhecidas, além de poder fornecer subsídios importantes para o monitoramento das populações e estratégias de manejo e conservação (YACK et al. 2013; HILDEBRAND et al., 2105; HODGE et al., 2018; HILDEBRAND et al., 2109; MCCULLOUGH, 2021).

Dada a riqueza de seu repertório vocal, uma gama de espécies de mamíferos marinhos tem sido o foco de estudos de bioacústica marinha (AU; HASTINGS, 2008). As ferramentas disponíveis para coletar e analisar dados bioacústicos passaram por uma verdadeira revolução nas últimas décadas e aumentaram substancialmente nossa capacidade de coletar e armazenar informações e usá-las como uma ferramenta de gestão (ZIMMER, 2011; VAN PARIJS et al., 2009; BAUMGARTNER et al., 2019; NORRIS et al., 2017; DAVIS et al., 2020; FERGUSON; CLAYTON; SAKAI, 2023). Isso oferece uma série de vantagens, como a possibilidade de monitoramento por períodos prolongados, em áreas de difícil acesso, ou em situações que, normalmente, não seria possível a aquisição de dados de maneira direta, como quando os animais estão submersos, durante o período noturno ou em condições oceanográficas desfavoráveis (MELLINGER et al., 2007; ANDRÉ et al., 2011; BAUMGARTNER et al., 2013; MILLER; MILLER, 2018; VAN OPZEELAND; HILLEBRAND, 2020; CAUCHY et al., 2020; GRIFFITHS et al., 2016; MILLER et al.,

2024). Os avanços tecnológicos atuais viabilizam o uso de uma ampla variedade de plataformas e ferramentas para o MAP de cetáceos, como conjuntos de hidrofones rebocados por embarcações (BARLOW; TAYLOR, 2005; NORRIS et al., 2017; DALPAZ et al., 2021), gravadores autônomos fixos (MELLINGER et al., 2007; DAVIS et al., 2020), boias de deriva (GRIFFITHS; BARLOW, 2016) e veículos subaquáticos autônomo (“gliders”) (BAUMGARTNER et al., 2013). Esses recursos permitem o registro de sons subaquáticos em diferentes escalas temporais e espaciais, ou até mesmo em tempo real (VAN PARIJS et al., 2009; ANDRÉ et al., 2011; BAUMGARTNER et al., 2013).

O uso do MAP tem possibilitado o avanço em diversas frentes da ecologia dos mamíferos marinhos, como o uso do habitat (DAVIS et al., 2020), estimativas populacionais (MARQUES et al., 2013), estudos comportamentais (OSWALD; RANKIN; BARLOW, 2008) e avaliação de impactos relacionados à poluição sonora (SOUTHALL et al., 2023). Soluções inovadoras para o monitoramento ambiental de forma remota como o MAP se fazem ainda mais necessárias frente a aceleração das mudanças climáticas (GIBB et al., 2018). Mamíferos marinhos, assim como outros organismos marinhos, podem sofrer consequências catastróficas, como perda de ecossistemas, alteração na distribuição das espécies e extinções devido às mudanças climáticas (GROOSE et al., 2020).

A longo prazo, o MAP pode se consolidar como uma técnica poderosa e de excelente custo-benefício para a pesquisa e conservação de cetáceos. No entanto, ainda existem diversas lacunas que precisam ser superadas para sua plena aplicação. Primeiramente, é essencial aprofundar o conhecimento sobre o repertório acústico das espécies. As características dos sinais acústicos de muitas espécies de cetáceos frequentemente se sobrepõem, o que dificulta sua identificação e limita o uso dos dados acústicos em estudos mais detalhados sobre essas espécies. Nesses casos, análises estatísticas e algoritmos de aprendizado de máquina são aplicados na tentativa de classificar as espécies (OSWALD et al., 2022). Este é o caso dos assobios produzidos por diversas espécies de golfinhos (Família Delphinidae). Os delfinídeos compõe a família mais diversa entre os cetáceos, cerca de 38 espécies (COMMITTEE ON TAXONOMY, 2025) e muitas destas apresentam um repertório de assobios bastante variável, tanto no nível intraespecífico como interespecífico (OSWALD et al. 2003, 2007). Apesar das dificuldades, nas últimas décadas houve bastante avanço na caracterização dos assobios e no desenvolvimento de classificadores acústicos para

identificar as espécies (MATTHEWS et al., 1999; RENDELL et al., 1999; OSWALD et al., 2003, 2007, 2021, 2022; GILLESPIE et al., 2013; AZZOLIN et al., 2014; LIMA et al., 2016; AMORIM et al., 2019, 2022; REGE-COLT et al., 2023; ANTICHI et al., 2024). Algumas espécies podem até serem identificadas com a validação manual de um analista experiente, porém o processamento torna-se trabalhoso, ou até mesmo inviável, diante de grandes volumes de dados. O avanço das tecnologias que ampliam a capacidade de coleta de dados precisa ser acompanhado pela automação dos processos de detecção e classificação acústica.

A coleta de um banco de dados de referência é um passo fundamental para o desenvolvimento de classificadores robustos, com dados compostos por registros visualmente validados e com alto grau de certeza quanto à identificação taxonômica dos sons biológicos. Um aspecto importante a ser considerado para delfinídeos, e também para outros grupos de cetáceos, é que as características espécie-específicas das vocalizações estão relacionadas a fatores comportamentais e evolutivos, o que resulta em variabilidade geográfica (LUÍS et al., 2021; PAPALE et al., 2013). Além disso, diferentes regiões geográficas podem abrigar distintas comunidades de espécies. Por isso, é fundamental que os modelos de classificadores sejam treinados com dados regionais, representativos da área onde se pretende aplicar o classificador, e que incluam o maior número possível de espécies locais.

A biodiversidade de cetáceos no Brasil inclui cerca de 45 espécies, das quais sete constam na Lista da Fauna Brasileira Ameaçada de Extinção (MMA, 2022). A costa brasileira abriga principalmente espécies de águas tropicais e subtropicais, além de espécies migratórias. Espécies de regiões mais temperadas também são registradas ocasionalmente (LODI; BOROBIA, 2013). Em grandes porções das águas jurisdicionais brasileiras a escassez quanto a riqueza e distribuição de cetáceos se deve em parte às dificuldades logísticas e os custos associados a pesquisa de mamíferos marinhos. No ambiente oceânico, estas limitações são ainda mais evidentes, pois tradicionalmente exige plataformas de pesquisa, que envolvem um custo alto, como embarcações offshore ou aeronaves. A aplicação de tecnologias de MAP juntamente com ferramentas de automação e classificação são técnicas que podem trazer um maior custo-benefício e ampliar os estudos de cetáceos na costa brasileira.

Este trabalho faz uso de um extenso banco de dados acústico de vocalizações (assovios e cliques) de espécies de odontocetos coletado na região da Bacia de

Santos, através do Projeto de Monitoramento de Cetáceos da Bacia de Santos (PMC-BS) da Petrobras. O produto proposto é um conjunto de ferramentas com aplicações na automatização da detecção e classificação de vocalizações de cetáceos coletadas por diferentes dispositivos no ambiente marinho. Além disso, tem aplicações na mitigação de impactos de atividades humanas que precisam detectar e identificar a presença de cetáceos, tais como sísmica marítima, construções marítimas, explosões, sonares e testes militares. A tese tem uma contribuição para o desenvolvimento de tecnologias no campo da biotecnologia ambiental, além das contribuições no conhecimento sobre o repertório acústico e biodiversidade de cetáceos em águas brasileiras pouco estudadas quanto a megafauna marinha. As ferramentas propostas como produto da tese têm um caráter regional, sendo, portanto, um produto que servirá de referência para as espécies e populações de mamíferos marinhos da Bacia de Santos.

O Capítulo 1 apresenta os resultados e a discussão do classificador de assovios desenvolvido para as espécies de delfinídeos mais comuns na Bacia de Santos. No Capítulo 2, os resultados dos detectores e classificadores de cliques para delfinídeos e um meta-classificador que integra os modelos de assovios e cliques. O Capítulo 3 traz os resultados e a discussão sobre a detecção e classificação automática de cliques de outras espécies de odontocetos encontrados na Bacia de Santos, incluindo membros das famílias Physeteridae (cachalote), Kogiidae (cachalote-anão), Ziphiidae (baleias-bicudas) e Pontoporiidae (toninha). Na última parte, são apresentadas as considerações finais, destacando as principais conclusões do trabalho, a relevância do conhecimento gerado e a aplicabilidade dos modelos desenvolvidos em relação ao objetivo proposto.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver métodos para a detecção e classificação de sinais bioacústicos de espécies de cetáceos odontocetos da Bacia de Santos.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Treinar e validar modelos de classificadores acústicos para a identificação de espécies de delfinídeos (família Delphinidae), com base na análise de sinais de comunicação (assovios).
- Treinar e validar classificadores acústicos de delfinídeos (família Delphinidae) baseados em cliques de ecolocalização, desenvolver um meta-classificador que combine assovios e cliques, e implementar um sistema integrado para predição de novos dados.
- Aplicar detectores automáticos e caracterizar os cliques de ecolocalização de odontocetos das famílias Physeteridae, Kogiidae, Ziphiidae e Pontoporiidae, com o objetivo de classificar as espécies no menor nível taxonômico possível.
- Propor uma metodologia para classificação de dados acústicos de cetáceos, generalizável e adaptável para contribuir em estudos ecológicos e esforços de conservação de odontocetos em diferentes regiões, incluindo a costa brasileira.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 DADOS BIOACÚSTICOS DE CETÁCEOS

Os dados utilizados nesta tese são provenientes do PMC-BS da Petrobras. Este projeto faz parte da condicionante ambiental exigida pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). O objetivo principal é avaliar os potenciais impactos nos cetáceos das atividades de produção de óleo e gás da Petrobras no polo pré-sal da Bacia de Santos. É um projeto de longo prazo, iniciado em 2015 e que está gerando dados inéditos para investigar aspectos ecológicos da comunidade de cetáceos da região, como a composição, distribuição, densidade, estrutura populacional, uso de habitat e estado de saúde. Os dados são coletados a partir de diferentes plataformas e instrumentações. Os métodos empregados incluem o uso de hidrofones para a coleta de dados bioacústicos. A coleta é feita através de uma embarcação que percorre a área rebocando um arranjo de hidrofones. Uma equipe dedicada de operadores de MAP monitoram os dados acústicos coletados em tempo real para fazer os registros das detecções acústicas de cetáceos. A amostragem é feita percorrendo linhas de transecto que se alternam ao longo das campanhas com o objetivo de amostrar a área da forma mais homogênea possível. A amostragem é realizada duas vezes por ano (estações quentes e frias) em campanhas de avistagem embarcada e monitoramento acústico passivo (AEMAP). As avistagens de grupos de cetáceos são feitas por uma equipe visual (observadores) e as detecções acústicas por uma equipe de operadores de MAP. Durante estas campanhas também são coletados dados de foto-identificação e biópsias para análise genética das espécies avistadas.

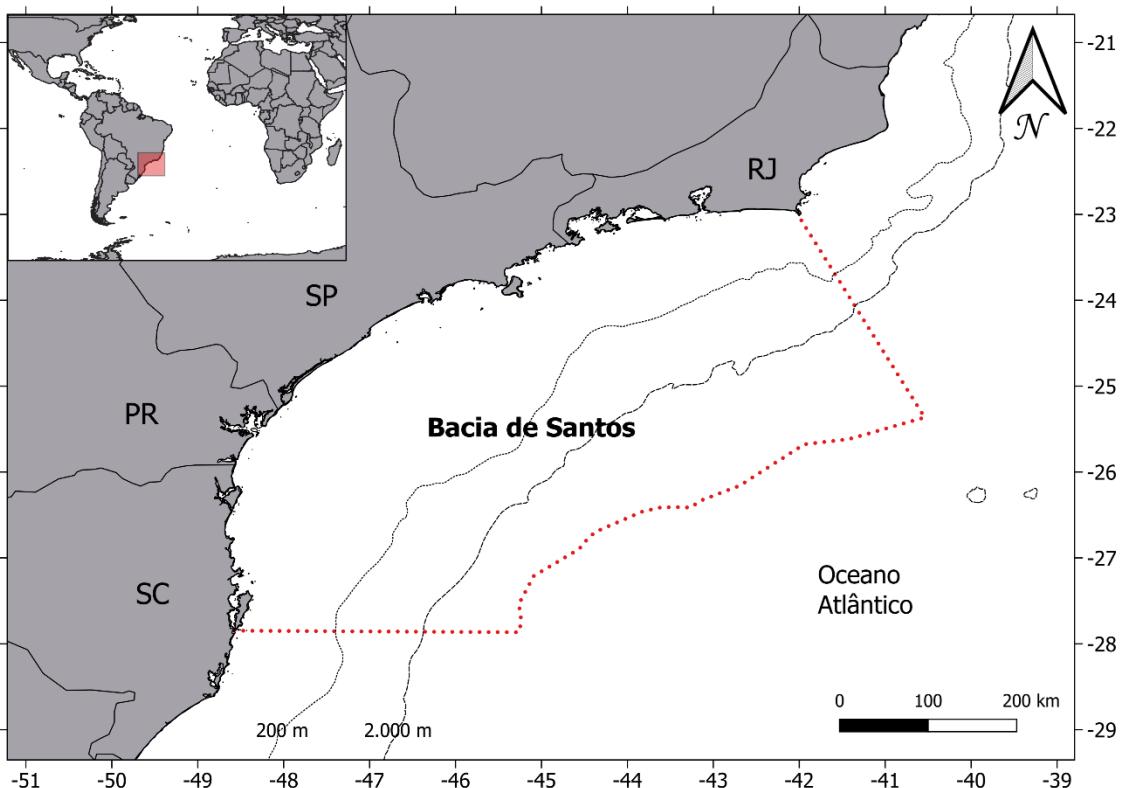
Um menor volume de dados bioacústicos provenientes de gravações oportunísticas com hidrofones lançados a partir da embarcação durante outras campanhas do PMC-BS (campanhas de telemetria) foram coletadas e também utilizadas nas análises. Assim como dados coletados numa área adjacente a Bacia de Santos, na região do campo Peregrino e seus entornos na Bacia de Campos. Semelhante ao PMC-BS, o Projeto de Monitoramento de Cetáceos do Peregrino (PMC-Per) faz parte de uma condicionante ambiental exigida pelo IBAMA para a empresa Equinor. Os equipamentos e metodologias de coleta de dados bioacústicos deste projeto foram similares aos do PMC-BS.

### 3.2 ÁREA DE ESTUDO

A área amostrada pelo PMC-BS abrange a Bacia de Santos, entre os paralelos 22° e 28°, cobrindo os estados de Santa Catarina, Paraná, São Paulo e Rio de Janeiro (Figura 3.1). No limite sul (Plataforma de Florianópolis) faz divisa com a Bacia de Pelotas e no limite norte (Alto de Cabo Frio) com a Bacia de Campos. A área total abrange desde regiões costeiras até profundidades de mais de 2.500 m e 350 km da costa. A área total é de cerca de 350.000 km<sup>2</sup>. Na literatura oceanográfica essa porção do Atlântico Sul Ocidental é conhecida como “South Brazil Bight” (BRANDINI; TURA; SANTOS, 2018).

A plataforma continental é larga (podendo chegar a mais de 200 km de extensão) com declividade suave em grandes porções do setor centro-sul da Bacia de Santos, enquanto na porção mais ao norte ocorre um estreitamento da plataforma e um declive mais acentuado. A corrente do Brasil predomina na região transportando águas quentes no sentido norte - sul ao longo da margem continental. A produtividade da região é de moderada a alta com grande variabilidade temporal e espacial (CAMPOS et al., 1995; EKAU; KNOPPERS, 2003). A Bacia de Santos possui destacada relevância do ponto de vista econômico, que inclui não somente a exploração de óleo e gás, mas também concentra atividades portuárias, pesqueira e de turismo. Essas atividades podem causar impactos no ambiente oceanográfico e na fauna marinha local, reforçando a necessidade de projetos de monitoramento ambiental na região (MOREIRA et al., 2023).

A área amostrada no campo Peregrino incluiu uma pequena porção da parte sul da Bacia de Campos, ao largo da costa norte do Rio de Janeiro (85 km da costa de Cabo Frio, RJ), no limite com a Bacia de Santos (Alto de Cabo Frio).



**Figura 3.1** - Mapa com os limites da área amostrada pelo Projeto de Monitoramento de Cetáceos de Bacia de Santos (PMC-BS/Petrobras).

### 3.3 COLETA DE DADOS

Os dados do PMC-BS foram coletados a partir de uma embarcação do tipo rebocador de 23m de comprimento (“Sea Route”) (Figura 3.2). As campanhas de AEMAP foram realizadas duas vezes ao ano (2015 e 2024) cobrindo um total de 18 campanhas. A embarcação navegou em transectos predefinidos numa velocidade constante de cerca de 7 nós. Cada campanha de coleta de dados percorreu diferentes linhas dos transectos em zigue-zague no sentido sul para o norte e norte para o sul, cobrindo a área duas vezes. Estas campanhas duraram cerca de 40 - 45 dias. Duas equipes abordo foram responsáveis pela coleta de dados (avistagem e MAP).

A equipe de avistagem, com 5 profissionais experientes em amostragem de cetáceos, se revezou em grupos de 3 observadores. A avistagem foi feita a partir de uma torre a 7 m do nível do mar durante o período diurno. Os observadores utilizaram binóculos e olho nu para detectar os grupos de cetáceos. Cada observador foi responsável por cobrir um campo de visão de acordo com a posição da embarcação (bombordo, proa e bôreste) e fazer os registros das avistagens, incluindo a data, hora, coordenada geográfica, identificação da espécie, tamanho de grupo, entre outros

(Figura 3.2). As campanhas também contavam com uma equipe de operadores de MAP que realizavam o monitoramento acústico passivo simultaneamente ao esforço de avistagem.



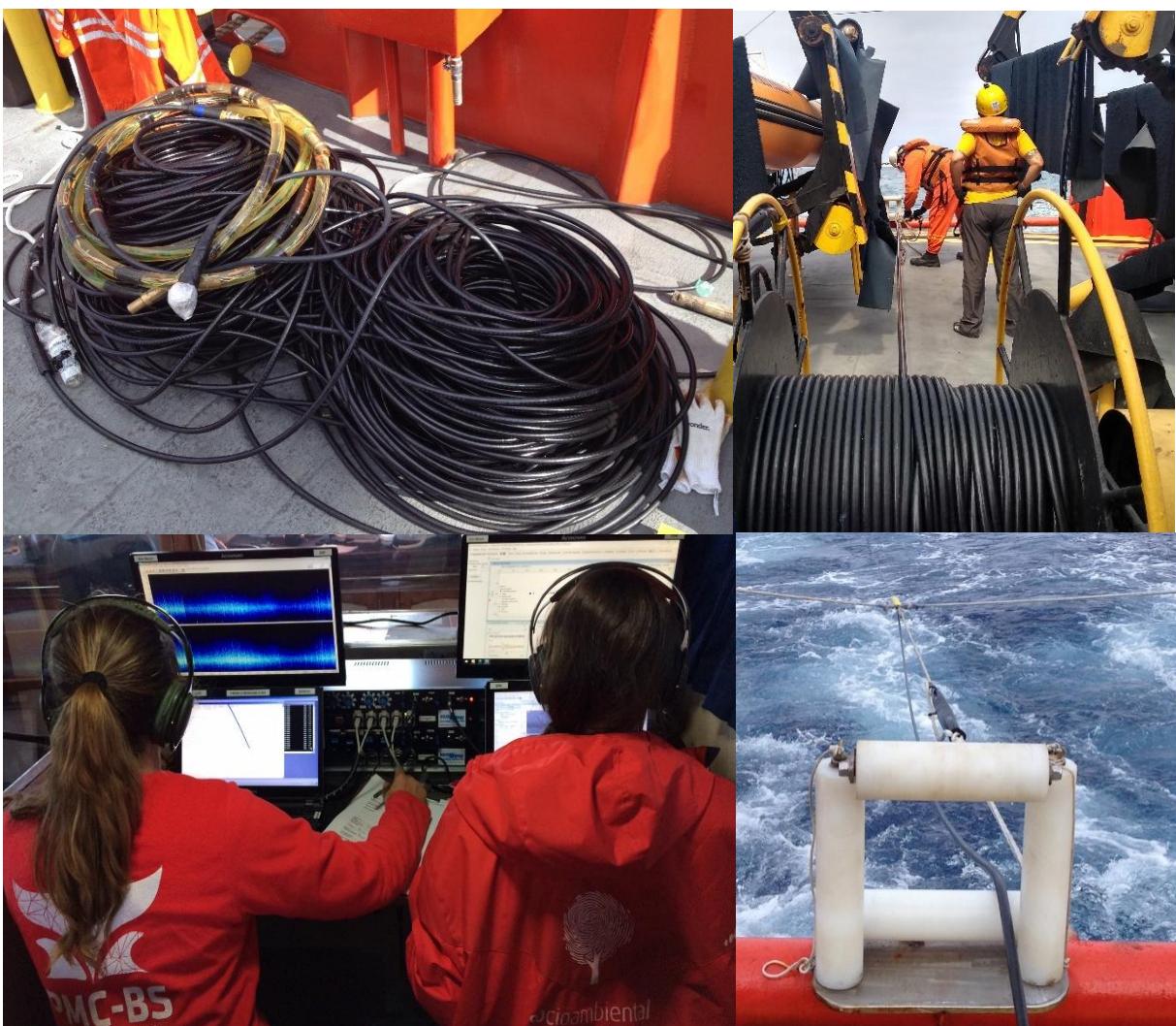
**Figura 3.2** - Embarcação “Sea Route” utilizada nas campanhas de AEMAP do PMC-BS (esquerda) e detalhe da torre de avistagem utilizada pelos observadores na varredura de cetáceos (direita).

### 3.3.1 Equipamentos de acústica

Os dados de acústica foram coletados a partir do lançamento de um cabo com arranjo de hidrofones rebocado a partir da popa da embarcação. O equipamento consistiu num cabo eletromecânico de 400 m de comprimento reforçado com poliaramida (cabô de reboque). Este cabo foi conectado a um arranjo de hidrofones (quatro elementos) contido em uma mangueira de poliuretano preenchido com óleo de rícino (Figura. 3.3). Foram utilizados três arranjos com características similares ao longo das campanhas. A disposição do arranjo foi dividida em pares, sendo que o primeiro par foi configurado para captar sons nas frequências típicas dos assobios de delfinídeos (1 - 48 kHz), denominado de par de frequências médias. Este par é formado por piezos cilíndricos (APC modelo 42-1021 ou Steminc), pré-amplificadores customizados com ganho entre 33 a 39 dB e um filtro passa-altas de 400 Hz . A distância entre os elementos do par foi de 2,0 a 3,8 m, conforme o arranjo. O segundo par, denominado de par de frequências altas, foi configurado para coletar dados acústicos que abrangem os cliques de ecolocalização dos odontocetos, nas frequências entre 1 - 170 kHz. Foram utilizados hidrofones da Reson (modelo TC 4013), pré-amplificadores customizados com filtro passa-altas de 400 Hz e ganho de 33 dB. A distância entre os elementos do par de alta frequência foi de 0,5 a 1,0 m,

conforme o arranjo. Os arranjos também continham um sensor de pressão (Keller 7) para monitorar a profundidade dos hidrofones na coluna da água.

O conjunto do arranjo de hidrofones e cabo de reboque foi lançado a partir de um guincho hidráulico. No convés da embarcação um cabo transmitiu o áudio captado pelo arranjo para uma estação de MAP (Figura 3.3). Nesta estação foi instalado um rack com eletrônicos para condicionamento do áudio análogo (filtros e amplificadores) e conversão análogo-digital do sinal. O sistema foi conectado a dois computadores que fizeram o armazenamento e as representações gráficas do áudio em tempo real. Os sinais de ambos os pares foram filtrados com um filtro-passa altas de 1 kHz. O par de frequência média foi amplificado com mais 20 dB de ganho, filtro passa-baixas de 48 kHz e o áudio digitalizado por uma placa ASUS (XONAR 7 com taxa de amostragem em 192 kHz). O par de frequência alta foi amplificado com mais 36 dB de ganho e um filtro passa-baixas de 170 kHz. O áudio foi digitalizado por uma placa NIDAQ (USB 6286 com taxa de amostragem em 500 kHz). O sinal estéreo digitalizado de ambos os pares foi gravado de forma interrupta e armazenado nos computadores. O sistema também continha um GPS conectado aos dois computadores. Por último, uma placa MC-DAQ fazia a leitura do sinal do sensor de pressão para conversão em profundidade. A profundidade média do hidrofone foi cerca de 20 - 25 m para o lançamento de 400m de cabo. Em águas rasas (abaixo de 40 m) foi feito um lançamento mais curto (cabو lançado a 150m da popa) para permitir amostragem em águas até 20 m. Neste lançamento mais curto a profundidade do hidrofone foi de cerca de 8 m. Abaixo de 20 m o arranjo era recolhido da água por questões de segurança.



**Figura 3.3 - Equipamentos de MAP.** Cabo de reboque eletromecânico e o arranjo de hidrofones no convés da embarcação (superior esquerda). Guincho hidráulico para lançamento do conjunto de cabo e hidrofones (superior direita). Estação de MAP com operadores realizando o monitoramento em tempo real (inferior esquerda). Detalhe do cabo rebocado a partir da popa da embarcação (inferior direita).

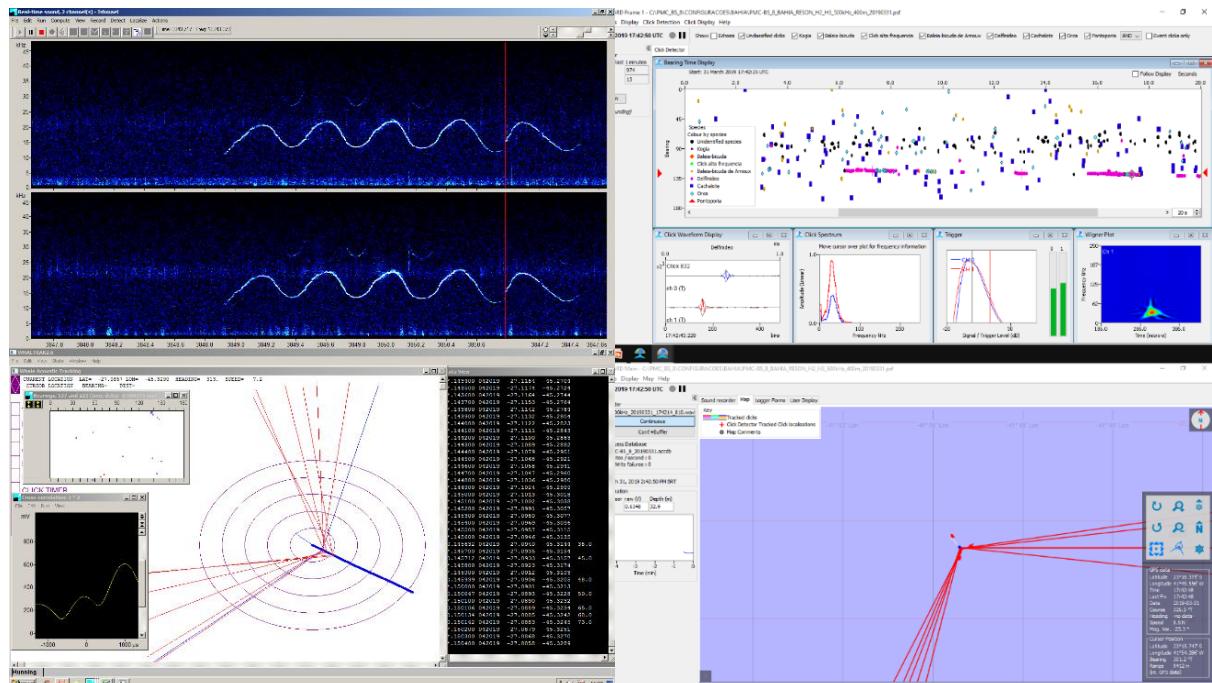
### 3.3.2 Detecção acústica de cetáceos em tempo real

O esforço de monitoramento foi contínuo durante todo o período do dia, juntamente com o esforço de avistagem (salve períodos de problemas técnicos ou condições que não ofereciam segurança de operação). Três operadores se revezaram em duplas. As duplas trabalhavam cada um operando um dos computadores e ambos faziam o monitoramento aural do áudio utilizando fones de ouvido. Para o áudio vindo do par de frequências médias foi utilizado o software Ishmael 1.0 (MELLINGER, 2001) para gerar espectrogramas (FFT 2048 pontos) com barra rolante e monitoramento em tempo real pelo operador. Além disso, o Ishmael calculava os ângulos de direção dos sinais recebidos e enviava a informação para um software de mapa alimentado pelo

sinal de GPS (Whaltrak2.6). O operador podia selecionar manualmente trechos das deteções de interesse (assovios), e plotar os ângulos de direção para visualizar no mapa. Deste modo, os operadores podiam inferir sobre o ângulo de direção dos animais (com ambiguidade quanto ao lado da embarcação). Quando sucessivos sinais foram plotados foi possível estimar a distâncias dos grupos detectados (técnica conhecida como análise do alvo em movimento). A Figura 3.4 ilustra um exemplo de uma deteção de assovios de golfinhos, mostrando o espectrograma e os ângulos de direção dos sinais plotados.

No computador que recebeu os sinais do par de frequências altas foi utilizado o módulo de detector de cliques do software PAMGuard. O PAMGuard é um software para detecção, classificação e localização de vocalizações de mamíferos marinhos (GILLESPIE et al., 2008). O detector foi desenvolvido para detectar sinais transientes e impulsivos, característicos dos cliques de ecolocalização dos odontocetos. As configurações podem ser ajustadas para a aplicação de filtros digitais, limiares de detecção, classificação dos cliques, formas de visualização na interface gráfica, entre outros. Nas campanhas AEMAP o detector de cliques foi utilizado em tempo real e supervisionado pelo operador de MAP, que fez os registros de detecção e localização dos grupos de cetáceos a partir da visualização dos cliques na interface gráfica do detector. O gráfico representa o tempo no eixo x e a direção do sinal detectado no eixo y, numa escala que vai de 0 a 180 graus (ângulo entre a proa e a popa, respectivamente). Os pontos com diferentes formas e cores do gráfico representam as detecções e foram configurados de acordo com a classificação pelo pico de frequência do clique. A Figura 3.4 apresenta o gráfico do detector com o registro de pequenas cadeias de cliques de um grupo de golfinhos (pontos em rosa no gráfico). Ao clicar em cima de qualquer um dos pontos representados pelos cliques, é possível observar logo abaixo os gráficos do clique selecionado, conforme mostra a Figura 3.4. Os gráficos são da forma da onda, espectro de frequência e gráfico de Wigner-Ville, que auxiliam no diagnóstico do clique como sendo verdadeiro (biológico) ou falso positivo (ruído). Os cliques falsos são comuns e muitas vezes previsíveis, tal como a presença de ruído constante nos 20 graus (maior parte com pico de frequência entre 2 e 30 kHz), gerado pelo colapso de bolhas de ar (cavitação) provocada pelos propulsores da embarcação. Na direção de 90 graus são mais comuns os ruídos provocados pelo fluxo da água e vibração do cabo de reboque e arranjo de hidrofones. Áreas com muita atividade de invertebrados produzem falsos positivos (estalos) em

ângulos variados. Os ângulos de direção dos cliques selecionados pelo operador podiam ser plotados num mapa georreferenciado do próprio PAMGuard para estimativa de distância dos animais detectados.



**Figura 3.4 - Interface gráfica dos softwares utilizados no monitoramento acústico passivo para detecções de cetáceos em tempo real.** No canto superior esquerdo, o software Ishmael exibe um espectrograma com uma deteção de assvio. No canto inferior esquerdo, o Whaltrak 2.6 apresenta o mapa com a plotagem dos ângulos. À direita, o PAMGuard mostra, na parte superior, a interface do detector de cliques e, na inferior, o mapa com os ângulos correspondentes.

### 3.3.3 Associação entre as detecções visuais e acústicas de cetáceos

Os registros das detecções de cetáceos durante as campanhas de AEMAP seguiram protocolos específicos para cada uma das equipes. Para não interferir na metodologia e na probabilidade de detecção dos observadores, as detecções acústicas não eram comunicadas para a equipe de avistagem. Contudo, todas as detecções visuais eram comunicadas para a equipe de operadores de MAP. A comunicação entre a equipe visual e de acústica foi mantida por rádios VHF. Sempre que possível buscava-se associar as detecções acústicas com as detecções visuais. As associações foram feitas tendo em vista a localização e o grupo taxonômico dos animais reportados pela equipe de avistagem comparado ao tipo e intensidade dos sons detectados pelos operadores de MAP. Sempre que possível eram feitas comparações entre a localização das detecções acústicas e a localização reportada pela equipe visual.

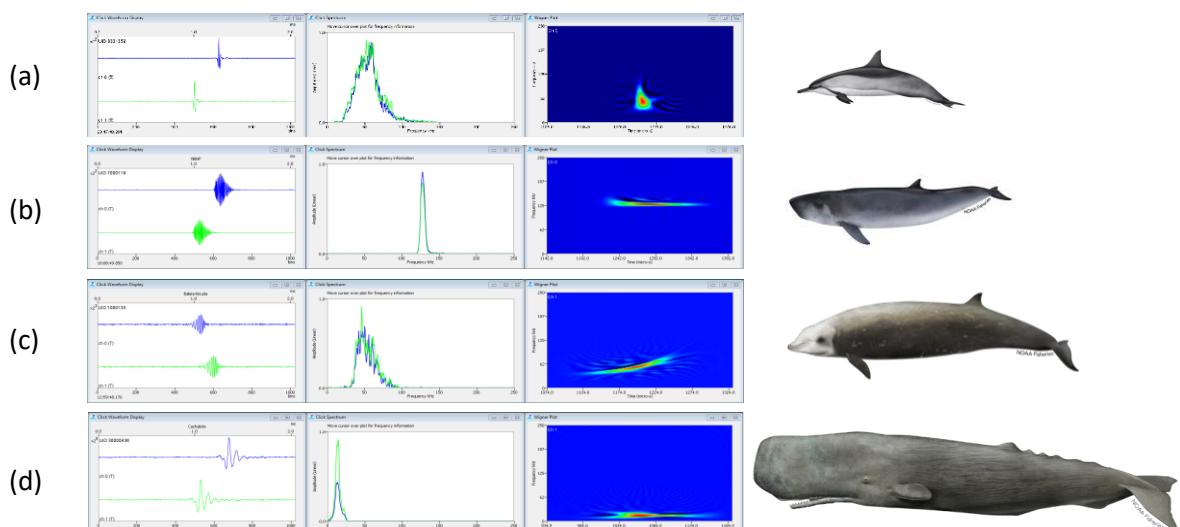
O pareamento entre as detecções visuais e acústicas foi fundamental para a construção de um banco de dados acústico das espécies. Para ser incluído foi necessário que a avistagem confirmasse a presença de uma única espécie. Sempre que eram avistados grupo mistos (com mais de uma espécie), as detecções acústicas foram descartadas das análises. Também ocorreram situações em que grupos de diferentes espécies não estavam associados em um grupo misto, mas foram avistados próximos um do outro. Assim como para os grupos mistos, quando a distância entre dois ou mais grupos de espécies avistadas foi menor do que três milhas náuticas, as detecções acústicas foram descartadas, já que havia o potencial de conterem vocalizações de mais uma espécie. Estes protocolos foram estabelecidos para que a associação entre as detecções acústicas e a confirmação visual da espécie pudessem ser feitas de maneira assertiva. As detecções acústicas com a confirmação visual das espécies formaram o conjunto de dados referência (“ground-truth”) para o desenvolvimento de modelos de classificadores.

No entanto, também ocorreram detecções acústicas registradas em campo que puderam ser associadas a grupos específicos de cetáceos, sem a necessidade de confirmação visual. Isto por que entre os cliques de odontocetos, quatro tipos podem ser distinguidos com base em características nos gráficos do detector de cliques do PamGuard mencionados previamente. Um operador treinado monitorando o detector de cliques pode identificá-los e classificá-los entre os quatro tipos descritos abaixo e ilustrados na Figura 3.5:

- 1) Cliques de banda-larga de delfinídeos: os cliques de banda larga estão associados as espécies de delfinídeos (família Delphinidae), que inclui desde golfinhos de pequeno a médio porte (1,5 a 4 m de comprimento) até animais de maior porte (>4 a 9m), como a baleia-piloto (gênero *Globicephala*) e a baleia-orca (*Orcinus orca*). A frequência de pico encontra-se geralmente entre 20 a 100 kHz e o intervalo entre os cliques são curtos (abaixo de 0,5 s) (AU et al., 1993).
- 2) Cliques de frequência alta e banda estreita (NBHF ou “narrow band high frequency”): este tipo de clique é característico de um conjunto de espécies que inclui os kogídeos (Família Kogidae), composta por duas espécies, o cachalote-pigmeu (*Kogia sima*) e a cachalote-anã (*Kogia breviceps*). Cliques deste tipo também são característicos de algumas espécies costeiras, como a toninha

(*Pontoporia blainvilliei*), presente em águas do sul e sudeste do Brasil. Outras espécies com cliques similares incluem algumas espécies de delfinídeos (gênero *Lagenorhynchus* e *Cephalorhynchus*) e os botos da família *Phocoenidae* (focenídeos), distribuídos em águas mais temperadas e raramente registrados em águas brasileiras. O pico de frequência é mais alto do que os outros tipos de cliques (entre 100 a 140 kHz) (MADSEN et al., 2005).

- 3) Cliques de zifídeos: estes cliques são associados às espécies de baleias-bicudas (grupo de mais de 20 espécies pertencentes à família *Ziphiidae*, também chamados de zifídeos). Os cliques apresentam uma modulação ascendente (BAUMANN-PICKERING et al., 2013) que é exclusivo deste grupo.
- 4) Cliques do cachalote: o cachalote (*Physeter macrocephalus*) produz cliques com características distinguíveis de outras espécies, que estão dentro do espectro audível (entre 5 - 15 kHz) e são emitidos em intervalo regulares, tipicamente entre 0,5 - 2,0 s (MOHL et al., 2003).



**Figura 3.5** - Exemplos dos quatro tipos de cliques de ecolocalização de diferentes grupos de odontocetos. (a) Cliques de banda larga típicos de delfinídeos, (b) cliques de alta frequência e banda estreita (NBHF) encontrados em diferentes grupos de espécies, incluindo os zifídeos (c) clique de frequência modulada típico de baleias-bicudas (zifídeos) (d) cliques do cachalote centrados em frequências mais baixas (cerca de 15 kHz). Os gráficos são do detector de cliques do programa PAMGuard. Da esquerda para direita, representam o gráfico da forma da onda, espectro de frequência e o gráfico de Wigner que auxiliam na identificação de cada tipo. Ao lado, uma figura de uma espécie de odontoceto representante de cada grupo, de acordo com o tipo do clique (a) golfinho-rotador (*Stenella longirostris*), (b) cachalote-pigmeu (*Kogia breviceps*), (c) baleia-bicuda-de-Cuvier (*Ziphius cavirostris*) e (d) cachalote (*Physeter macrocephalus*).

### 3.4 CLASSIFICADORES ACÚSTICOS DE DELFINÍDEOS

Os modelos de classificadores acústicos foram desenvolvidos usando o método de floresta aleatória (BREIMAN, 2001). A floresta aleatória (“random forest”) é um algoritmo de aprendizado de máquina supervisionado, baseado em árvores de decisão (BREIMAN et al., 1984). Para estes modelos não existem premissas de normalidade ou colinearidade dos dados. As árvores de decisão partem de um conjunto de variáveis, selecionando aquelas que maximizam o ganho de informação a cada divisão binária dos dados (particionamento recursivo). As árvores produzem regras de decisão com base no nódulo raiz (todos os dados) e formam ramos até chegar nos nódulos terminais ou folhas (grupos de objetos atribuídos a cada uma das classes predefinidas). A floresta aleatória se utiliza de um conjunto de árvores de decisão através de múltiplas amostragens dos dados usando o “bootstrap” (reamostragem com reposição). Outro fator de randomização é adicionado limitando um conjunto aleatório de variáveis utilizadas em cada nódulo das árvores. Cada árvore produz um resultado e a classificação é feita com base na classe que tiver os votos da maioria das árvores. O método produz um conjunto de árvores diferentes umas das outras, o que evita o sobreajuste dos dados e aumenta a capacidade de generalização e predição de novos dados. Os modelos podem ser otimizados através de métodos de validação cruzada para encontrar parâmetros ótimos que limitam o número de árvores, o número de variáveis utilizadas a cada divisão e a profundidade máxima das árvores. Os métodos de classificação descritos a seguir foram aplicados tanto para assovios como os cliques. Os modelos foram desenvolvidos utilizando o pacote scikit-learn versão 1.5.2 (PEDREGOSA et al. 2011) do Python (versão 3.12).

#### 3.4.1 Métricas de classificação

Para avaliação do desempenho dos classificadores foram utilizadas métricas amplamente usadas na avaliação de modelos de classificação (PEDREGOSA et al. 2011): precisão, sensibilidade (recall), F1-score e acurácia. As métricas foram calculadas para cada uma das espécies incluídas nos modelos, além das métricas globais. As definições conforme abaixo:

## Precisão

Mede a proporção correta entre aquelas em que o modelo classificou como positivas. Ou seja, entre todas as previsões feitas para uma determinada espécie, qual foi a proporção de previsões corretas. Descreve a capacidade do modelo de evitar os falsos positivos:

$$\text{Precisão} = \frac{\text{Verdadeiros Positivos (VP)}}{\text{Verdadeiros Positivos (VP)} + \text{Falsos Positivos (FP)}}$$

## Sensibilidade (recall)

Mede a proporção de verdadeiros positivos em relação ao total de verdadeiros reais para uma determinada espécie. Descreve a capacidade do modelo de identificar corretamente as ocorrências positivas de uma espécie:

$$\text{Sensibilidade} = \frac{\text{Verdadeiros Positivos (VP)}}{\text{Verdadeiros Positivos (VP)} + \text{Falsos Negativos (FN)}}$$

## F1-score

O F1-score é uma métrica que combina precisão e sensibilidade em um único valor. É calculada a partir da média harmônica entre precisão e sensibilidade:

$$F1 = 2 \times \frac{\text{Precisão} \times \text{Sensibilidade}}{\text{Precisão} + \text{Sensibilidade}}$$

O F1-score busca equilibrar a exatidão das previsões corretas positivas e a capacidade de detectar corretamente os casos positivos e dá uma visão mais completa do desempenho do modelo. Além do F1-score para cada espécie foi obtida a média ponderada do F1-score, levando-se em conta o número de amostras de cada espécie. Essa métrica oferece uma avaliação mais robusta do desempenho global, especialmente em cenários desbalanceados.

## Acurácia

A acurácia mede a proporção de previsões corretas em relação ao total de previsões feitas pelo modelo. Também é considerada uma medida geral de desempenho, conforme a fórmula abaixo:

$$\text{Acurácia} = \frac{\text{Número de Previsões Corretas}}{\text{Número Total de Previsões}}$$

Para evitar o enviesamento que a acurácia global pode sofrer devido ao desbalanceamento, também foi calculada a acurácia balanceada, conforme a fórmula abaixo:

$$\text{Acurácia Balanceada} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{Sensibilidade}_i$$

A acurácia balanceada é calculada a partir da média da sensibilidade entre as espécies (sensibilidade de cada espécie dividida pelo número total de espécies). O resultado da acurácia balanceada pode ser considerado mais robusto, pois garante que todas as espécies tenham impacto igual, mesmo que haja desbalanceamento entre as amostras testadas entre as espécies.

A especificidade, métrica que corresponde à razão entre verdadeiros negativos e a soma de verdadeiros negativos e falsos positivos, não foi incluída nesta avaliação. Em cenários com dados de teste desbalanceados, as espécies minoritárias tendem a apresentar um número elevado de verdadeiros negativos, uma vez que a maioria das amostras pertence a outras espécies. Isso pode inflar artificialmente os valores de especificidade, levando a interpretações equivocadas sobre o desempenho do modelo. Por último, a matriz de confusão é uma tabela que permite avaliar o desempenho de um modelo de classificação, mostrando como as previsões do modelo se comparam aos valores reais. As linhas representam as espécies reais e as colunas as espécies preditas. As previsões corretas são representadas na diagonal da matriz (verdadeiros positivos) que está associada a acurácia do modelo para cada uma das espécies.

## CAPÍTULO 1

### 4 CLASSIFICADOR ACÚSTICO DE ASSOVIOS DE DELFINÍDEOS DA BACIA DE SANTOS

#### 4.1 MATERIAIS E MÉTODOS

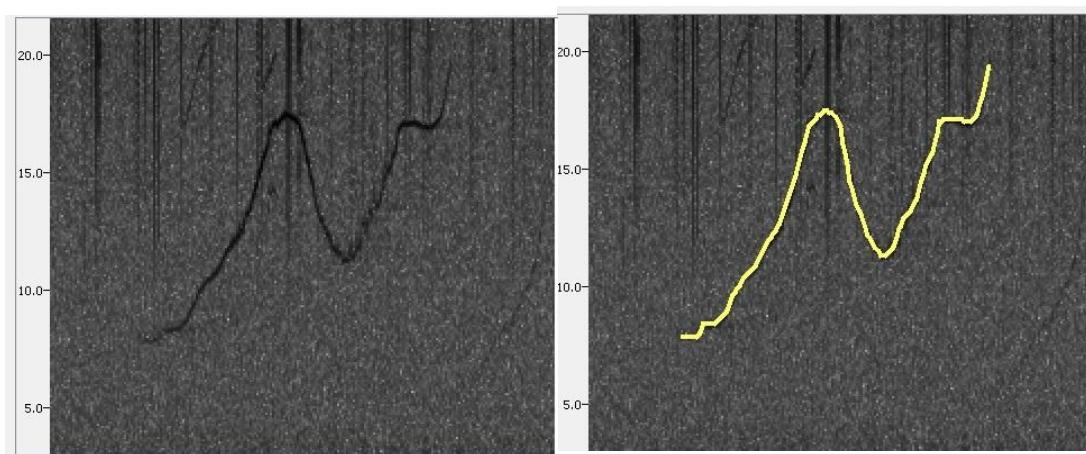
##### 4.1.1 Processamento de assovios

Para as análises de assovios, foram utilizados arquivos de áudio provenientes do par de frequência média (taxa de amostragem de 192 kHz). Optou-se pela extração manual dos assovios, em vez da utilização do detector automático disponível no software PAMGuard. O algoritmo de detecção automática de assovios realiza a busca por picos de frequência no espectrograma, com base em um limiar predefinido de relação sinal/ruído (GILLESPIE et al., 2013). No entanto, os assovios detectados por esse método frequentemente resultam em fragmentos de sinais, ou seja, apenas partes do assvio são identificadas e, em casos de sinais sobrepostos, podem conter segmentos de diferentes assovios. Dessa forma, a análise manual foi adotada, com o objetivo de preservar os assovios completos e evitar o uso de fragmentos.

A primeira etapa de processamento de dados dos assovios foi fazer uma varredura manual dos arquivos de áudio para confirmar e selecionar amostras das detecções acústicas registradas em campo. A varredura foi feita a partir de espectrogramas no programa Raven Pro 1.6 (K. LISA YANG CENTER FOR CONSERVATION BIOACOUSTICS, 2025). Foram gerados espectrogramas de 2048 pontos e sobreposição de 50% (resolução de frequência de 93,75 Hz e resolução de tempo de 5,33 s). Os assovios encontrados na varredura foram selecionados e segmentados em amostras individuais que alimentou o banco de dados. As amostras de cada espécie foram agrupadas em registros independentes denominados de eventos acústicos, definido como o conjunto de detecções acústicas correspondentes a um encontro com um grupo de golfinhos.

A seleção manual das amostras dos assovios seguiu critérios pré-estabelecidos, tanto critérios de qualidade do sinal como do que considerar um assvio individual. Entre os critérios de qualidade, três categorias subjetivas foram adotadas, que refletem a relação sinal/ruído do assvio: qualidade boa, média e ruim. Sinas de qualidade boa foram bem destacados e claramente visíveis no

espectrograma. Assovios de qualidade média eram de qualidade suficiente para identificar o contorno dos assovios do começo ao fim. Já os assovios fracos, o contorno não era bem definido e difícil de visualizar e foram desconsiderados. Apenas os assovios classificados como de qualidade boa e média foram selecionados para as análises. Quando havia quebras (descontinuidades no contorno do sinal) foi estabelecida uma regra para quando considerar um assvio com quebra ou separá-los em dois assovios diferentes. Se o intervalo era maior do que 250 ms foi considerado como dois assovios diferentes. Este intervalo foi escolhido baseado em observações do intervalo típico entre repetições do mesmo tipo de assvio produzido pelo golfinho-nariz-de-garrafa (*Tursiops truncatus*) (JANICK et al., 2013). Ainda que este intervalo não se aplique a todas as espécies, o critério foi estabelecido para que houvesse consistência para os dados de todas as espécies. Nos casos de assovios sucessivos e com sobreposição, a seleção limitou-se àqueles que foram possíveis separar sem ambiguidade cada assvio individual. Trechos com muitos assovios continuamente sobrepostos foram descartados. A separação foi feita quando havia poucos assovios sobrepostos, muitas vezes pela diferença de amplitude. Quando um tipo de assvio previamente observado isolado no mesmo evento acústico foi identificado entre assovios sobrepostos, também foi possível separá-los sem ambiguidade. Não foi estabelecido nenhum critério para evitar amostrar assovios semelhantes ou estereotipados mais de uma vez, sejam eles produzidos em sequência ou em diferentes períodos de um mesmo evento acústico. No caso da presença de harmônicos, os critérios de seleção basearam-se sempre na frequência fundamental do sinal. As amostras dos assovios foram processadas para extração do contorno e medições das variáveis descritoras. Para isso foi utilizado o módulo ROCCA (“Real-time Odontocete Call Classification Algorithm”) do PAMGuard, desenvolvido especificamente para a análise e classificação de sons de odontocetos (OSWALD; OSWALD, 2013). Foi gerado um espectrograma de cada assvio analisado e o contorno obtido manualmente através de múltiplos pontos conectados, conforme ilustrado na **Figura 4.1**.



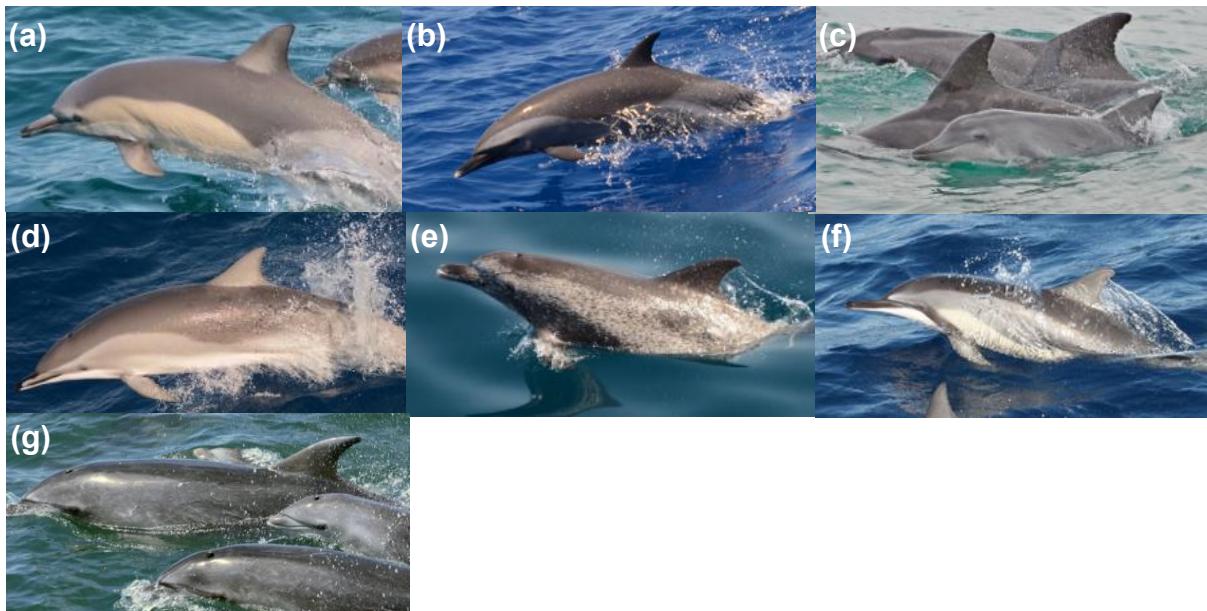
**Figura 4.1** - Exemplo da extração do contorno de um assvio no módulo ROCCA do PAMGuard.

A partir do contorno o algoritmo ROCCA extraiu 44 variáveis. Entre elas variáveis de medições de frequência, tempo e modulação. As características básicas de um assvio são, por exemplo, a frequência inicial, final, mínima, máxima e duração. A modulação do assvio pode ser classificada como de frequência ascendente, descendente ou plana (sem modulação). Os pontos dos assvios em que a modulação muda entre positiva (ascendente) e negativa (descendente) ou vice-versa são chamados de pontos de inflexão. Algumas variáveis envolvem a frequência e tempo, como por exemplo, as medições da inclinação da modulação dos assvios medida kHz/s, a duração entre pontos de inflexão ou a porcentagem do assvio que compõe períodos de modulação ascendente, descente ou plana, entre outras. A lista completa com a descrição das 44 variáveis encontra-se no Apêndice A. Estas variáveis foram utilizadas para o desenvolvimento de um classificador acústico de assvios das espécies de delfinídeos da Bacia de Santos.

#### 4.1.2 Treinamento e validação do classificador acústico de assvios de delfinídeos

A base de dados de assvios de delfinídeos utilizada para o desenvolvimento do classificador acústico incluiu sete espécies. São elas: golfinho-comum (*Delphinus delphis*), golfinho-pintado-pantropical (*Stenella attenuata*), golfinho-de-dentes-rugosos (*Steno bredanensis*), golfinho-de-clymene (*Stenella clymene*), golfinho-pintado-do-Atlântico (*Stenella frontalis*), golfinho-rotador (*Stenella longirostris*) e

golfinho-nariz-de-garrafa (*Tursiops truncatus*) (**Figura 4.2**). Cinco espécies para as quais houve registros visuais e acústicos na Bacia de Santos não foram incluídas no classificador devido à baixa representatividade nos dados (número reduzido de eventos acústicos ou assovios), o que inviabilizaria o desenvolvimento de um modelo robusto. São elas: baleia-orca (*Orcinus orca*), baleia-piloto-de-peitorais-curtas (*Globicephala macrorhynchus*), falsa-orca (*Pseudorca crassidens*), orca-pigmeia (*Feresa attenuata*) e golfinho-cabeça-de-melão (*Peponocephala electra*). Além disso, outras duas espécies, o boto-cinza (*Sotalia guianensis*) e o golfinho-de-Fraser (*Lagenodelphis hosei*), não apresentaram dados acústicos disponíveis.



**Figura 4.2** - Fotos registradas em campo ilustrando as sete espécies de delfinídeos incluídas no classificador acústico de assovios da Bacia de Santos. (a) *Delphinus delphis*, (b) *Stenella attenuata*, (c) *Steno bredanensis*, (d) *Stenella clymene*, (e) *Stenella frontalis*, (f) *Stenella longirostris*, (g) *Tursiops truncatus*. Créditos: PMC-BS/Petrobras.

A partir do total de amostras de assovios analisados do banco de dados acústico, uma série de classificadores com diferentes estratégias de validação cruzada foram aplicados. As espécies que apresentaram baixa representatividade no banco de dados foram inicialmente excluídas a fim de melhor explorar o potencial de classificação entre as espécies mais representativas. O número total de assovios de cada evento acústico foi limitado em 50 amostras para evitar uma super amostragem de eventos acústicos com um maior número de assovios.

Para o classificador de assovios foram utilizadas duas abordagens diferentes para a divisão dos dados entre conjunto de treinamento e teste. Na primeira, os dados

foram divididos aleatoriamente sem que fossem agrupadas entre eventos acústicos. Neste caso, assovios de um mesmo evento acústico podiam ser aleatoriamente amostrados tanto para os conjuntos de treinamento e de teste. Na segunda abordagem, os assovios do mesmo evento acústico foram mantidos agrupados, portanto, os assovios de um evento estiveram sempre nos dados de treinamento ou de teste, mas nunca em ambos. Para ambas as abordagens, após a separação dos dados de treinamento e teste, os dados de treinamento foram sempre balanceados (subamostragem dos dados) de maneira que todas as espécies fossem igualadas em número de amostras para treino. Este passo foi necessário devido os valores muito desproporcionais de amostras entre as espécies, o que poderia enviesar o classificador. Tipicamente, modelos com dados excessivamente desbalanceados resultam em melhores resultados para as espécies mais representadas em contrapartida das minoritárias. O balanceamento foi feito atribuindo pesos (probabilidades) aos diferentes eventos acústicos, sendo que aqueles com menor número de assovios tiveram um peso maior. Isto para que mesmo eventos com poucas amostras de assovios pudessem estar representadas nos dados de treinamento, com o objetivo de preservar a variabilidade de assovios. Em todos os processos de divisão de dados, treinamento e teste dos modelos, foram definidos diferentes valores fatores de randomização (“random state”), o que controla a aleatoriedade de todos os processos e assegura a reproduzibilidade dos resultados.

Na primeira abordagem feita sem agrupamento (eventos podiam estar tanto nos dados de treinamento como de teste), foi utilizada a estratégia de validação cruzada k-fold com 5 subconjuntos ( $k=5$ ). Neste método, os dados foram subdivididos em 5 partes iguais. Essa divisão foi estratificada, de forma que a mesma proporção das amostras entre as espécies do banco de dados original foi mantida. Um dos subconjuntos é utilizado para teste (20% dos dados) e o restante utilizado para treinamento (80%). Os dados de treinamento são previamente balanceados e o subconjunto testado. Neste método os subconjuntos se alternam até que todos sejam testados. O modelo classifica cada assvio de acordo com a distribuição de probabilidades (proporção de votos) entre as diferentes espécies. A espécie predita é determinada pelo voto majoritário de cada assvio (maior proporção de votos).

Para fazer uma busca dos hiperparâmetros ótimos do modelo k-fold foi extraída uma amostra balanceada a partir de todo o conjunto de dados (com o mesmo valor do “random state”). A grade de busca incluiu combinações de modelos para os

seguintes valores de hiperparâmetros: 100, 200, 300, 500 ou 1.000 árvores, profundidade das árvores entre 5, 10, 15, 20, 25, 30 ou sem limite e o número de variáveis a cada divisão com valores correspondentes a 50%, 75%, logaritmo da base 2 ou raiz quadrada do número total de variáveis. O ranqueamento dos modelos foi feito a partir do resultado da média ponderada do F1-score de cada combinação de hiperparâmetros. Os pesos da média ponderada foram atribuídos de acordo com o número total de amostras de teste para cada espécie. Entre os melhores modelos do ranque, até uma margem de diferença de 0,5% na pontuação, foi escolhido o modelo com menor número de variáveis e menor profundidade das árvores. Isto por que modelos mais simples geralmente tem maior poder de generalização e são menos suscetíveis ao sobreajuste dos dados de treinamento. Quanto ao número de árvores, foi dada preferência para modelos com maior número, o que tende a dar maior estabilidade ao modelo, ainda que após um limite ótimo há pouco ganho com adição de mais árvores. Por fim, foram feitas cinco execuções do modelo k-fold, utilizando diferentes fatores de randomização para reproduzir diferentes situações de aleatorização para o balanceamento dos dados e geração das árvores. Na prática isso significa que para cada execução, os dados de treinamento, estrutura das árvores, assim como os hiperparâmetros ótimos obtidos foram diferentes entre si. O resultado final é a média das métricas obtidas para cada uma das cinco execuções. O resultado médio de cinco execuções tem o papel de diminuir a variabilidade e sensibilidade dos modelos a determinadas condições iniciais ou de amostragem dos dados.

Na segunda abordagem (eventos acústicos agrupados), a divisão dos dados manteve a integridade do conjunto de assovios dos eventos acústicos, o que permitiu que, além da classificação das amostras individuais, os eventos acústicos também fossem considerados como uma unidade de classificação. A predição neste caso foi feita somando-se os votos das árvores de todas as amostras de assovios que compõe o evento acústico. A abordagem de classificar os eventos acústicos se aproxima mais de uma situação real de classificação. Os dados acústicos coletados em campo geralmente são de um trecho de gravação do qual se pretende classificar um conjunto de vocalizações (assovios e/ou cliques) provindas de um determinado grupo, aqui denominado de evento acústico.

A validação cruzada para esta abordagem de divisão dos dados foi realizada através da técnica de “deixar-um-grupo-de-fora” (do inglês “Leave-One-Group-Out” ou LOGO). O treinamento e teste iterativo de modelos a partir da estratégia LOGO

funciona da seguinte forma: um único evento acústico (grupo) é retirado (deixado de fora) para teste e o restante dos dados utilizados para o treinamento. Os dados para treino passam pela etapa de balanceamento e o evento deixado de fora é testado a partir do modelo treinado. O evento testado volta então para os dados de treinamento e um novo evento é retirado para o teste. Este processo é repetido até que todos os eventos sejam testados. O total de iterações e modelos corresponderá ao número total de eventos testados. Os resultados obtidos podem ser analisados para classificar as amostras individuais de assovios, mas também a classificação considerando todo o conjunto de assovios pertencentes ao evento. Por exemplo, em um modelo de classificação com 1.000 árvores e um evento de teste com 30 assovios, são consideradas os votos das 30.000 árvores (votos de 1.000 árvores para cada assvio). Portanto a validação cruzada LOGO gera dois resultados: a classificação de amostras individuais de assovios obtida de cada amostra testada (LOGO ind) e a classificação do grupo obtida de cada evento testado (LOGO grupo).

Para a busca dos hiperparâmetros ótimos do modelo LOGO foi extraída uma amostra balanceada a partir de todo o conjunto de dados (com o mesmo “random state” pré-definido na etapa de balanceamento do classificador LOGO). A grade de busca dos hiperparâmetros ótimos incluiu combinações dos seguintes valores de: 100, 500 ou 1.000 árvores, profundidade das árvores de 10, 20, 30 ou sem limite e o número de variáveis a cada divisão com valores correspondentes a 10 variáveis, 75% das variáveis, logaritmo da base 2 ou raiz quadrada do total de variáveis. O ranqueamento dos modelos foi feito a partir do resultado da média geral do F1-score ponderada pelo número total de amostras testada para cada espécie. Entre os modelos no topo do ranque (com uma margem de diferença de até 0,5%) foi escolhido o modelo que tivesse o menor número de variáveis por divisão e menor profundidade das árvores, mas dada preferência para modelos com maior número de árvores. Similar a validação cruzada k-fold, foram feitas cinco execuções do LOGO, utilizando diferentes fatores de randomização fixados para o balanceamento dos dados e para construção do conjunto de árvores. O resultado final foi a média das métricas obtidas entre as cinco execuções.

#### 4.1.2.1 Importância das Variáveis

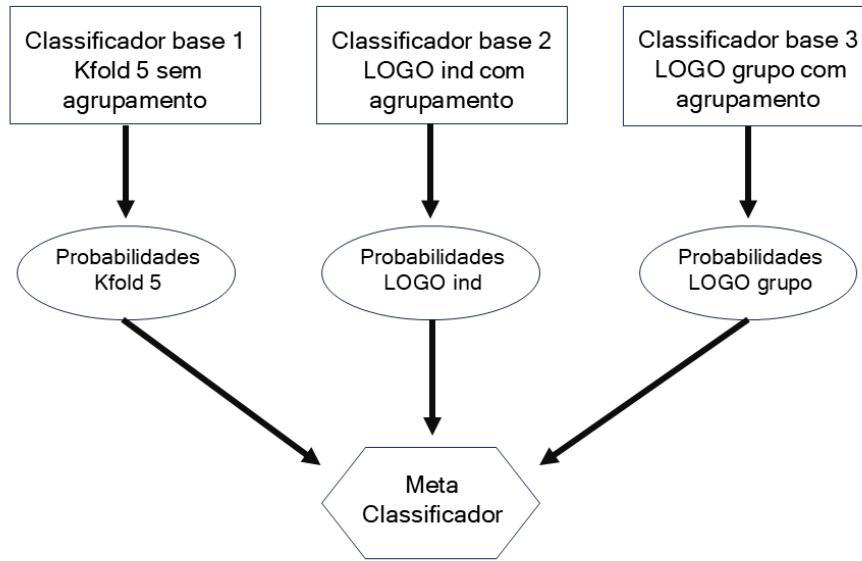
Foi feita uma análise da importância das variáveis do modelo de classificação que utilizou a estratégia de validação LOGO. Esta análise foi feita a partir de amostras balanceadas de todo o conjunto de dados. Para isto, foi treinado os mesmos cinco modelos utilizados nas cinco execuções da validação cruzada LOGO, com seus respectivos hiperparâmetros ótimos e valores de “random state”. A partir destes modelos foi calculada a importância das variáveis através do método de permutação. As variáveis foram aleatoriamente substituídas no modelo (100 repetições) e aquelas que foram retiradas e fizeram o modelo diminuir a acurácia são ranqueadas como as mais importantes. Também foi explorada a importância das variáveis entre as diferentes espécies. Foi utilizado o algoritmo TreeSHAP. Os valores SHAP (“SHapley Additive exPlanations”) utiliza as informações das próprias árvores, aplicando a teoria dos jogos cooperativos no contexto do modelo de floresta aleatória. O algoritmo calcula a contribuição das variáveis para cada uma das amostras ao comparar os resultados quando uma determinada variável for incluída ou excluída de um conjunto aditivo de outras variáveis. Como os valores de SHAP são calculados para cada amostra, a importância das variáveis para as espécies é calculada a partir da média dos valores SHAP das amostras das respectivas espécies.

#### 4.1.2.2 Meta-Classificador de assovios

Além dos classificadores tradicionais apresentados anteriormente, onde o treinamento é feito com os dados originais, foi utilizada a estratégia de desenvolver meta-classificadores. O meta-classificador combina resultados de diferentes classificadores (denominados de classificadores de base) da seguinte maneira: treinamento e teste dos classificadores de base numa primeira etapa e treinamento de um meta-classificador numa segunda etapa, utilizando os resultados dos classificadores de base como dados de entrada. As variáveis utilizadas para o meta-classificador foram os resultados das distribuições das probabilidades de classificação de cada amostra de assovios testada a partir dos classificadores de base. A vantagem desta técnica é que permite que o meta-classificador faça uma combinação entre os pontos fortes e fracos de cada classificador base, com o potencial de encontrar padrões nos acertos e erros dos classificadores de base (quais espécies são

confundidas com qual e em que proporção). Os meta-classificadores aprendem a generalizar a partir dos resultados de um conjunto de modelos e reduz o risco do sobreajuste aos dados de treinamento. Os classificadores de base (distribuição de probabilidades) utilizados foram aqueles obtidos a partir das diferentes estratégias de validação cruzada e divisão dos dados: k-fold e LOGO. No caso do LOGO são dois resultados: classificação dos assobios individuais (LOGO ind) e eventos acústicos (LOGO grupo), portanto são dois dados de entrada diferentes. No modelo LOGO grupo existe apenas uma distribuição de probabilidades referente ao evento acústico. Todas as amostras de assobios pertencentes ao evento têm a mesma probabilidade. São, portanto, três combinações de resultados (meta-variáveis) que formaram o meta-classificador. A ideia é que cada classificador de base aprenda diferentes aspectos dos dados e que a combinação destes resultados, através de um meta-classificador possa fornecer melhor desempenho, principalmente para espécies difíceis de classificar. A **Figura 4.3** ilustra a estrutura do meta-classificador.

As probabilidades de cada classificador base foram obtidas através da média de cada uma das cinco execuções, tanto para o k-fold quanto para o LOGO. Para testar o meta-classificador foi utilizada novamente a estratégia de validação cruzada de deixar um grupo de fora, definido como modelo LOGO meta. Assim como nos classificadores de base, foram feitas cinco execuções do meta-classificador e os resultados obtidos a partir da média. Os mesmos métodos de obtenção dos parâmetros ótimos e cálculo da importância das variáveis também foram realizados. Os resultados de classificação de amostras individuais do meta-classificador tendem a ser superestimados e foram considerados apenas os resultados finais da classificação de eventos acústicos.



**Figura 4.3** - Estrutura do meta-classificador. As previsões geradas pelos classificadores de base são os dados de entrada (meta-variáveis) que combinadas irão alimentar o meta-classificador.

#### 4.1.3 Classificação dos eventos acústicos por número de assovios

Foi feita uma avaliação de desempenho de classificação dos eventos acústicos em relação a quantidade de assovios. A ideia é verificar qual a quantidade mínima de assovios para se ter maior estabilidade e taxas de acerto na classificação dos eventos acústicos. Estas análises foram feitas separadamente para cada espécie com base nos resultados obtidos pelos classificadores LOGO. Foram agrupados todos os eventos acústicos de cada espécie, e partir de então foram feitas amostragens aleatórias para que todos os eventos ficassem com o mesmo número de assovios, começando com um único assvio até o máximo de 50 por evento. Após, foi calculado a proporção de eventos que foram corretamente classificados dentre aqueles com o mesmo número de assovios. Quando o número de assovios a ser testado passava do limite de assovios disponíveis de um determinado evento, este era então desconsiderado dos cálculos seguintes. Este procedimento foi repetido por 100 vezes, sendo que em cada repetição uma amostra aleatória diferente de assovios foi selecionada e a proporção de taxa de acerto dos eventos calculada. Foi feita a média da taxa de acerto para as 100 repetições, repetido para cada uma das cinco rodadas

da validação cruzada LOGO. Foi calculada a média, desvio e o erro padrão entre as rodadas. Os resultados de cada espécie (número de assovios pela média da porcentagem de classificação correta) foram analisados num gráfico para observar tendências na relação entre o número de assovios e a estabilidade e desempenho da classificação dos eventos acústicos.

## 4.2 RESULTADOS

Entre os pequenos cetáceos registrados na Bacia de Santos, as sete espécies incluídas no classificador são aquelas mais frequentemente encontradas, abrangendo habitats da plataforma continental, do talude e das águas oceânicas da região.

No total foram 204 grupos e 4.622 assovios utilizados para o treinamento e testes de modelos de classificadores (**Tabela 4.1**). A maior parte dos eventos acústicos e assovios foram do golfinho-pintado-do-Atlântico (*S.frontalis*) (95 eventos ou 47% do total). Já a espécie com menor representatividade foi o golfinho-de-dentes-rugosos (*S.bredanensis*) (6 eventos ou 3% do total). Os dados usados para teste foram sempre balanceados antes de treinar os modelos. O balanceamento foi feito a partir da espécie minoritária (*S.bredanensis* com 139 amostras) e produziu dados de treinamento com 973 amostras igualmente distribuídas entre as espécies. Entra as diferentes abordagens de divisão de dados e validação, todas os assovios e eventos acústicos se alternaram nos dados de teste. Portanto, nos dados de teste o desbalanceamento entre as espécies se manteve.

**Tabela 4.1** - Sumário do volume de dados acústicos das sete espécies de delfinídeos analisadas. Dados coletados durante 18 campanhas de amostragem visual e acústica do PMC-BS na Bacia de Santos e duas campanhas do PMC-Peregrino na Bacia de Campos. Os eventos acústicos são os registros independentes de grupos de golfinhos. Os assovios selecionados correspondem ao total de amostras obtidas das gravações e os assovios processados correspondem ao total utilizado no treinamento e teste de classificadores (limitado a 50 por evento).

Espécie	Número total de eventos acústicos	Número total de assovios selecionados	Número total de assovios processados
<i>Delphinus delphis</i>	8	331	230
<i>Stenella attenuata</i>	19	577	378
<i>Steno bredanensis</i>	6	139	139
<i>Stenella clymene</i>	14	628	435
<i>Stenella frontalis</i>	95	2.148	1.767
<i>Stenella longirostris</i>	24	2.385	847
<i>Tursiops truncatus</i>	38	1.162	826
<b>Total</b>	<b>204</b>	<b>7.370</b>	<b>4.622</b>

No **Apêndice C** encontra-se a tabela com as principais variáveis (parâmetros acústicos) obtidas para os assovios destas sete espécies

#### 4.2.1 Validação cruzada k-fold sem agrupamento de eventos acústicos

A acurácia global média para as cinco rodadas da validação cruzada k-fold foi de 53% ( $\pm 0,3$ ) e a acurácia balanceada 57% ( $\pm 0,5$ ) (**Tabela. 4.2**). A sensibilidade entre as espécies variou bastante, sendo que as espécies com melhores resultados foram *S.bredanensis* com 87%, seguido de *S.clymene* (67%), *D.delphis* (61%), *S.frontalis* (57%), *S.longirostris* (52%), *S.attenuata* (45%) e por último *T.truncatus* com um desempenho abaixo de todas as outras espécies (31%) (**Tabela 4.2**). A sensibilidade de 31% indica que cerca de 69% dos assovios da espécie não foram classificados como pertencentes a ela (falsos negativos). Isso revela que o modelo teve dificuldade para classificar *T.truncatus*. Quanto a precisão, os valores mais baixos foram para *D.delphis* e *S.attenuata* (22% e 30% respectivamente), apontando a ocorrência de muitos falsos positivos relacionados a estas espécies. Para outras espécies a precisão também se manteve baixa, entre 41% a 52% para *T.truncatus*, *S.bredanensis* e *S.clymene*. Já *S.longirostris* e *S.frontalis* tenderam a ter valores um pouco mais altos (65%). A relação entre as espécies minoritárias (com menos amostras testadas) e majoritárias (com mais amostras testadas) influenciou os resultados de precisão, uma vez que o modelo tende a atribuir falsos positivos das espécies majoritárias às classes minoritárias, o que reduz a precisão das minoritárias. A precisão isolada neste contexto não é uma boa métrica de desempenho. No geral os baixos valores de sensibilidade e precisão das espécies foi refletido no F1-score. As pontuações mais baixas foram para *D.delphis* (32%), *S.attenuata* (36%) e *T.truncatus* (39%). As outras espécies foram acima de 50%, chegando até o máximo de 66% para *S.frontalis*. A média ponderada do F1-score, que é uma métrica que ajuda a corrigir as distorções provocadas pelo desbalanceamento, foi de 54%, o que aponta para um desempenho mediano.

#### 4.2.2 Validação cruzada LOGO com agrupamento de eventos acústicos

A acurácia média global das cinco execuções do classificador LOGO ind foi de 47% ( $\pm 1,0$ ) e acurácia balanceada 51% ( $\pm 0,8$ ) (**Tabela 4.2**). Os resultados revelaram que, comparado a validação cruzada k-fold sem agrupamento, o modelo com os assóvios agrupados teve maior dificuldade em classificar corretamente os assóvios no nível individual. As métricas seguiram os mesmos padrões de desempenho entre as espécies observadas no modelo k-fold. Contudo, os valores foram ligeiramente inferiores em todas as métricas avaliadas. Para *T.truncatus* em particular, a sensibilidade diminuiu com maior intensidade, alcançando apenas 17%. Para *T.truncatus* foi obtido um número elevado de amostras de assóvios a partir do banco de dados utilizado, quando comparado à outras espécies com menor tamanho amostral (ex; *S.bredanensis* e *D.delphis*). Isto sugere que o modelo realmente não está aprendendo padrões específicos da espécie e o desempenho beirou as chances de acerto para uma classificação aleatória.

Os resultados da classificação ao nível de evento acústico (LOGO grupo), foram substancialmente melhores comparados aos do k-fold e LOGO ind. Foi observada uma melhora nas pontuações de quase todas as espécies. A acurácia global (média das cinco execuções) foi de 76% ( $\pm 1,5$ ) e a acurácia balanceada 80% ( $\pm 2,0$ ) para um total de 204 grupos testados (**Tabela 4.2**). As melhorias foram em todas as métricas, sendo que a sensibilidade chegou a 100% para *S.bredanensis*, seguido de *S.clymene* com 90%, *S.attenuata* (87%), *S.frontalis* (85%), *S.longirostris* (84%), *D.delphis* (82%), e por último *T.truncatus* com 31%. A precisão chegou a valores entre cerca de 80% a 90% para espécies como *S.frontalis*, *S.longirostris* e *T.truncatus* e 72% para *S.clymene*. Espécies em que a precisão aumentou, mas continuam sendo atribuídos muitos falsos positivos foram *S.bredanensis*, *D.delphis* e *S.attenuata* com pontuações de 57%, 55% e 52%, respectivamente. A precisão mais baixa destas espécies foi um efeito do desbalanceamento dos dados, sendo que espécies com maior número de eventos e assóvios testados tiveram maior precisão. No geral, a melhora foi para todas as espécies com exceção da sensibilidade de *T.truncatus*, que permaneceu com desempenho similar a validação cruzada k-fold sem agrupamento, sugerindo uma dificuldade em reconhecer a espécie mesmo no nível de eventos acústico. *T.truncatus* está entre as espécies com número de amostras intermediário na distribuição entre as espécies. A sensibilidade baixa indica

que são muitos falsos negativos da espécie. Como o modelo não classifica a espécie com frequência, também são poucos falsos positivos, e os acertos acabaram inflando a precisão da espécie. Os falsos negativos de *T.truncatus* são falsos positivos de outras espécies, o que acaba interferindo na precisão destas outras espécies, limitando o desempenho geral do classificador. O F1-score alcançou pontuações de cerca de 90% para espécies majoritárias (com maior número de amostras), incluindo *S.frontalis*, *S.longirostris* e *S.clymene*. Para *S.attenuata* e *D.delphis* as pontuações do F1-score também foram boas, com 78% e 70%, respectivamente. O F1-score (média harmônica entre a precisão e a sensibilidade) foi de 68% para *T.truncatus* elevado pela precisão mais alta, apesar da baixa sensibilidade. O menor valor do F1-score foi observado para a espécie com menor número de amostras de eventos e assovios do banco de dados, *S.bredanensis* (64%), influenciado pela baixa precisão, embora a sensibilidade tenha sido de 100% (sem falsos negativos). A média ponderada do F1-score foi de 75%, indicando um bom desempenho para a classificação dos eventos acústicos.

**Tabela 4.2** - Resultados da precisão, sensibilidade, F1-score, acurácia, acurácia global e acurácia global balanceada do classificador de assovios para sete espécies de delfinídeos da Bacia de Santos. Os resultados são de diferentes estratégias de divisão dos dados e de classificação: k-fold (k=5) sem separar os eventos (assovios dos eventos presentes tanto nos dados de treino como de teste), LOGO (com agrupamento e validação cruzada por exclusão de um evento) com dois resultados: LOGO ind para o agregado dos assovios individuais e LOGO grupo para a classificação de eventos acústicos. Os resultados da validação destas três estratégias foram os dados de entrada para um meta-classificador utilizado para a classificação de eventos (LOGO meta). Cada resultado representa a média de cinco execuções com dados de treinamento平衡ados e hiperparâmetros otimizados.

Espécie	Métrica	KFOLD 5	LOGO ind	LOGO Grupo	LOGO Meta
<i>Delphinus delphis</i>	Precisão	0,22	0,17	0,55	0,46
	Sensibilidade	0,60	0,51	0,83	0,68
	F1 - score	0,32	0,25	0,66	0,54
<i>Stenella attenuata</i>	Precisão	0,30	0,27	0,52	0,54
	Sensibilidade	0,45	0,42	0,87	0,83
	F1 - score	0,36	0,33	0,65	0,66
<i>Steno bredanensis</i>	Precisão	0,41	0,40	0,57	0,50
	Sensibilidade	0,87	0,83	1,00	0,83
	F1 - score	0,56	0,54	0,72	0,63
<i>Stenella clymene</i>	Precisão	0,43	0,39	0,72	0,86
	Sensibilidade	0,67	0,62	0,90	0,86
	F1 - score	0,53	0,48	0,79	0,86
<i>Stenella frontalis</i>	Precisão	0,79	0,77	0,89	0,91
	Sensibilidade	0,57	0,53	0,85	0,85
	F1 - score	0,66	0,63	0,87	0,88
<i>Stenella longirostris</i>	Precisão	0,65	0,58	0,78	0,91
	Sensibilidade	0,52	0,50	0,83	0,81
	F1 - score	0,58	0,54	0,81	0,85
<i>Tursiops truncatus</i>	Precisão	0,53	0,36	0,81	0,74
	Sensibilidade	0,31	0,17	0,31	0,57
	F1 - score	0,39	0,23	0,45	0,64
Acurácia geral		0,53	0,47	0,76	0,78
<b>Acurácia geral balanceada</b>		<b>0,57</b>	<b>0,51</b>	<b>0,80</b>	<b>0,77</b>
<b>Média ponderada F1-score</b>		<b>0,54</b>	<b>0,47</b>	<b>0,75</b>	<b>0,79</b>

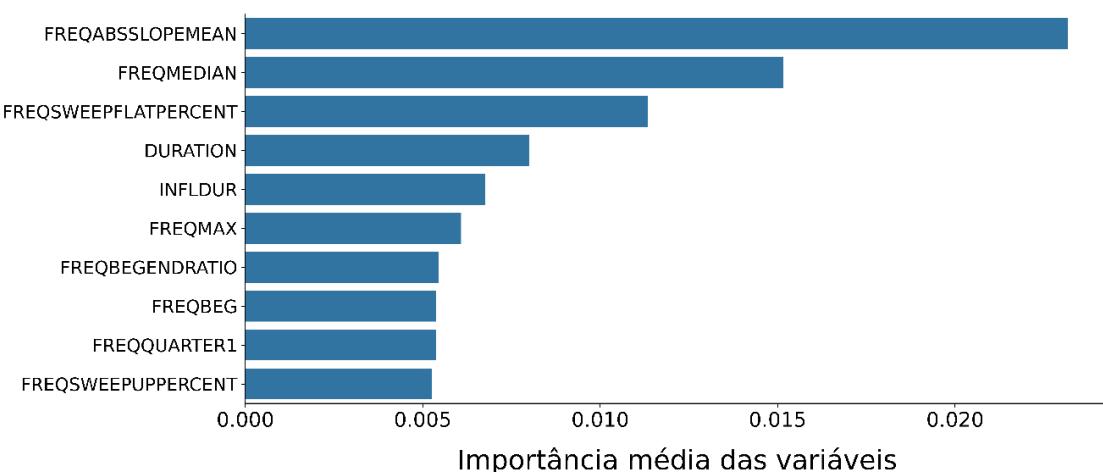
#### 4.2.3 Importância das variáveis

No ranque de importância global das variáveis (10 primeiras) calculadas pelo método de permutação, se destacou a inclinação média absoluta do contorno (FREQABSSLOPEMEAN), seguida pela frequência mediana (FREQMEDIAN) e o percentual de frequência plana (FREQSWEEPFLATPERCENT) (**Figura 4.4**). Esta última teve uma correlação negativa com FREQABSSLOPEMEAN (correlação de spearman com valor de - 0.77). Em seguida no ranque apareceram a duração (DURATION) e a razão entre o número de pontos de inflexão e a duração (INFLDUR). O restante das variáveis está relacionado a descritores de frequência, como por exemplo a frequência máxima (FREQMAX), frequência inicial (FREQBEG) e a razão entre a frequência inicial e final (FREQENDBEGRATIO), além de variáveis relacionadas à modulação, como o percentual de frequência ascendente (FREQSWEEPUPPERCENT). Isto sugere que tanto variáveis que descrevem a inclinação, frequência e duração dos assóvios foram importantes, e que combinações de conjuntos de variáveis correlacionadas reforçam o valor preditivo das variáveis para o modelo, mesmo aquelas que por ventura possuam algum grau de redundância.

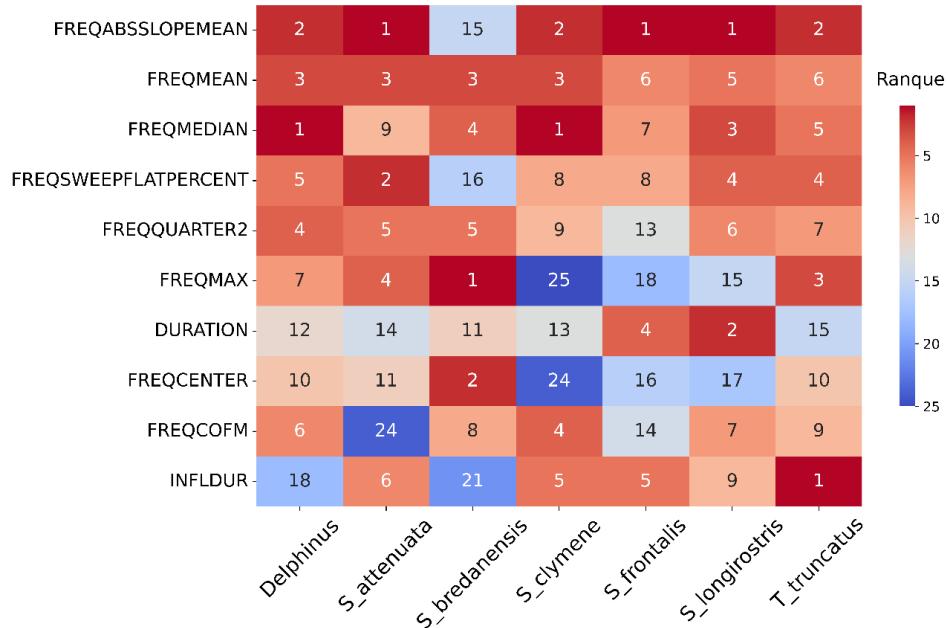
A importância de variáveis entre as espécies foi calculada através dos valores de SHAP e está representada a partir de um único modelo entre as cinco rodadas da validação cruzada LOGO (**Figura 4.5**). Diferente da permutação, os valores SHAP são calculados para cada amostra, e como as amostras são um pouco diferentes entre as execuções do modelo, não foi feita a média dos valores obtidos. Simplesmente fazer a média entre rodadas pode misturar distribuições diferentes e levar a interpretações enviesadas. Para cada variável foi calculado somente o desvio padrão dos valores SHAP entre as diferentes rodadas. A importância das variáveis por espécie mostrou que a variável FREQABSSLOPEMEAN (definida como a inclinação média absoluta do contorno em kHz/s) ficou entre as variáveis melhor ranqueadas para todas as espécies, com exceção de *S.bredanensis*. Um conjunto de variáveis de frequência correlacionadas entre si, como a frequência média, mediana, frequência central e frequência máxima também estiveram entre as melhores ranqueadas, ainda que em diferentes posições entre as espécies. A duração do assôvio foi melhor ranqueada para *S.frontalis* e *S.longirostris*. A razão entre o número de pontos de inflexão e a duração (INFLDUR) foi a primeira do ranque para *T.truncatus*, mas

também no ranque entre as 10 melhores para outras espécies, com exceção de *D.delphis* e *S.bredanensis*.

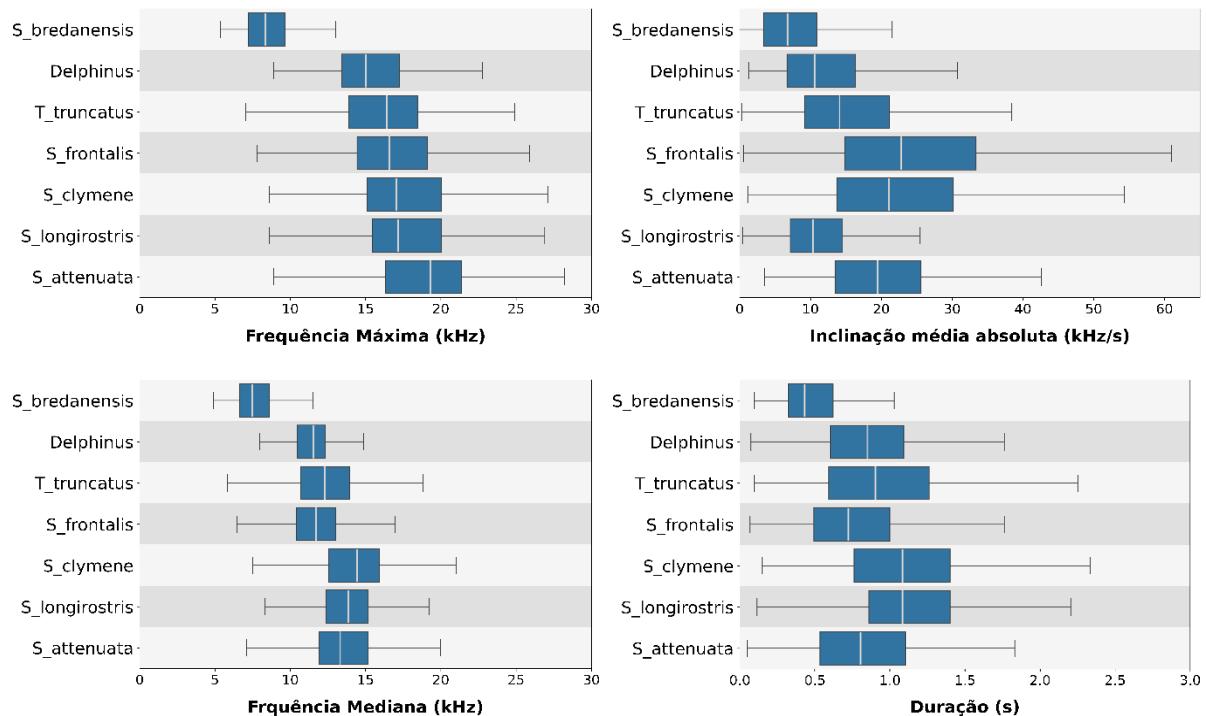
As variáveis melhor ranqueadas apresentaram valores de SHAP com desvio padrão mais elevado, indicando maior variação entre as rodadas de execução do modelo. Isto sugere que a combinação destas variáveis contribuiu para o poder preditivo do modelo, ainda que com bastante variabilidade e diferente graus de importância entre as espécies. Os box-plots (**Figura 4.6**) apresentam a distribuição de valores de variáveis consideradas importantes para os modelos. Nota-se que para *S.bredanensis*, a frequência máxima dos assobios foi a mais baixa entre as espécies, além de ter sido apontada como a variável melhor ranqueada em termos de importância (ver **Figura 4.5**). Para as demais espécies os valores da frequência máxima foram mais similares. Além da frequência máxima, outras variáveis de *S.bredanensis* também foram mais baixas, como a frequência mediana, inclinação média absoluta do contorno e duração (box-plots da **Figura 4.6**). Essas observações sugerem que assobios de frequência mais baixa tendem a ser mais curtos e com menor inclinação. Mas isto não foi observado em todas as espécies, para *S.longirostris*, por exemplo, a frequência máxima e a frequência mediana estiveram entre as mais elevadas, enquanto a inclinação média absoluta dos assobios esteve entre as mais baixas. Já para *S.attenuata*, a frequência máxima também esteve entre as mais altas, enquanto a duração dos assobios esteve entre as mais baixas no comparativo das espécies.



**Figura 4.4** - Importância global das variáveis para o classificador de assobios de delfinídeos da Bacia de Santos pelo método de permutação (siglas e descrição das variáveis no APÊNDICE A).



**Figura 4.5** - Importância das variáveis por espécie para o classificador de assobios de delfinídeos da Bacia de Santos, calculado a partir de valores SHAP (algoritmo TreeSHAP). Escala de cores e valores na matriz indicam a posição das variáveis no ranqueamento entre as espécies (siglas e descrição das variáveis no APÊNDICE A).



**Figura 4.6** - Box-plot da distribuição das variáveis acústicas: Frequência máxima (FREQMAX), Inclinação média absoluta do contorno (FREQABSSLOPEMEAN), Frequência mediana (FREQMEDIAN) e Duração (DURATION) dos assobios para as sete espécies de delfinídeos. Estas variáveis estão entre as 10 melhores ranqueadas em termos de importância para o modelo do classificador. A barra branca no box-plot representa a mediana. Os outliers foram excluídos do gráfico para melhor visualização da distribuição central.

#### 4.2.4 Meta-Classificador de assovios

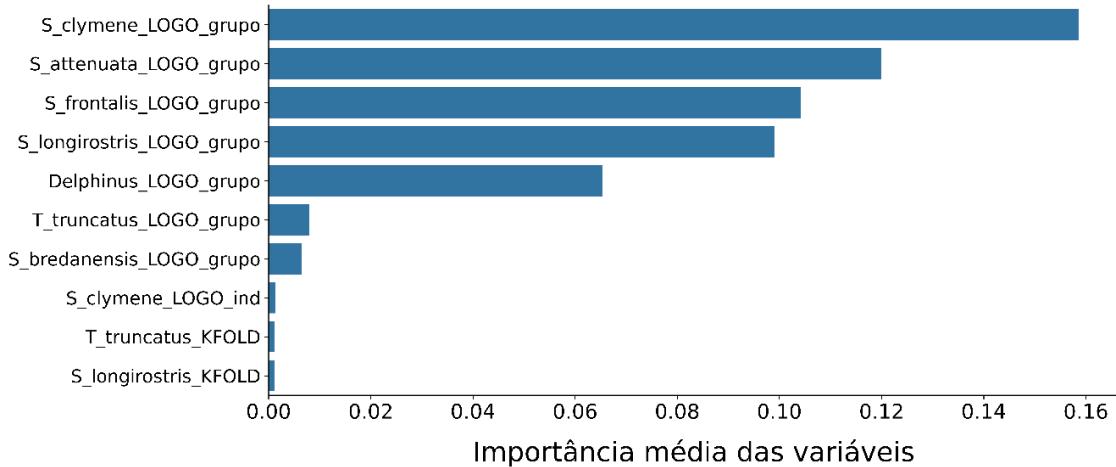
O meta-classificador foi desenvolvido a partir dos resultados dos três métodos de validação cruzada e classificação descritos anteriormente (k-fold, LOGO ind e LOGO grupo), denominados de classificadores de base. As distribuições de probabilidades geradas por esses classificadores são as meta-variáveis utilizadas no meta-classificador. Cada classificador de base gerou uma distribuição de probabilidades para os assovios. Com três classificadores e sete espécies, foram 21 meta-variáveis utilizadas pelo meta-classificador. Nos resultados do LOGO grupo, todos os assovios de um mesmo evento acústico receberam a mesma probabilidade. Devido a essa homogeneidade, o uso do meta-classificador em nível individual pode inflar as métricas e dar uma falsa impressão de desempenho. Assim, os resultados foram avaliados somente no nível de evento acústico, que reflete sua aplicação prática.

A acurácia global média das cinco rodadas do meta-classificador foi de 78% ( $\pm 0,4$ ) e 77% ( $\pm 1,6$ ) para a acurácia balanceada (**Tabela 4.2**). A acurácia balanceada foi um pouco menor do que a do classificador de base LOGO grupo. Os valores variaram entre as espécies. Particularmente, o meta-classificador teve uma melhora na sensibilidade de *T.truncatus* (57%), quando comparado com os resultados dos classificadores de base (31%). Quanto a sensibilidade das outras espécies, no geral houve reduções. Para *S.bredanensis* caiu de 100% para 83% e para *D.delphis* de 82% para 67%, também houve reduções na precisão destas espécies (entre 7 a 9%). Portanto, a melhora da sensibilidade de *T.truncatus* veio ao custo de uma piora, principalmente para estas duas espécies. Para outras espécies a redução na sensibilidade foi menor (até cerca de 5%) e houve uma tendência de um pequeno aumento da precisão para espécies com maior tamanho amostral, como *S.frontalis* e *S.longirostris* (91%), mas também para *S.clymene* (86%) e *S.attenuata* (54%). *T.truncatus* diminuiu a precisão (74%). O F1-score tendeu a ter resultados melhores para todas as espécies, com exceção de *S.bredanensis* e *D.delphis*, as quais houve piora tanto na precisão como sensibilidade. Para as outras, a melhora na precisão fez a pontuação de F1-score subir na comparação com os resultados do classificador de base LOGO grupo (ao custo de uma leve piora na sensibilidade). A média ponderada do F1-score também subiu e alcançou 79%. O destaque no meta-classificador foi

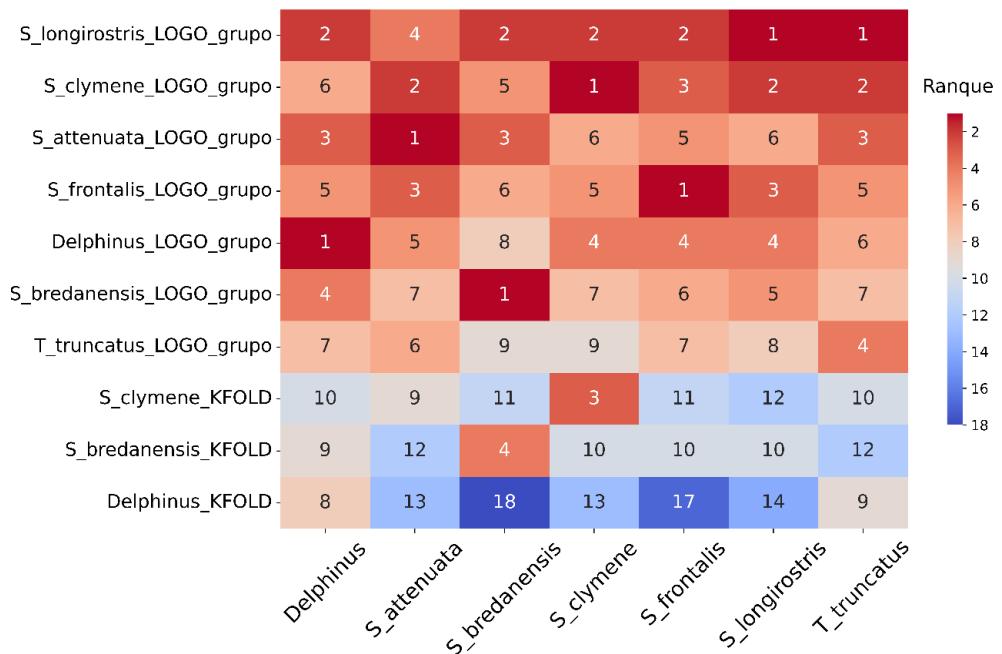
realmente *T.truncatus* que quase dobrou a sensibilidade (de 31% para 54%) e o F1-score aumentou de 45% para 64%.

#### 4.2.5 Importância das variáveis do meta-classificador

No ranque das 10 primeiras meta-variáveis de importância global foi notável que as variáveis que tiveram maior importância foram aquelas do classificador de base LOGO grupo. (**Figura 4.7**). Portanto, as meta-variáveis resultante da probabilidade de classificação dos eventos acústicos são aquelas em que as características espécie-específicas foram melhor aprendidas pelo meta-classificador. *S.clymene* foi a primeira do ranque, outras espécies como *S.frontalis*, *S.attenuata* e *S.longirostris* vieram em seguida, enquanto que *D.delphis*, *T.truncatus* e *S.bredanensis* foram as meta-variáveis ao nível de grupo com nível de importância mais baixa. As meta-variáveis dos classificadores de base ao nível de classificação individual de assovios (provenientes dos resultados da validação k-fold ou LOGO ind) ficaram mais abaixo no ranque, entre elas as meta-variáveis de *S.clymene* (LOGO ind), *T.truncatus* e *S.longirostris* (k-fold). A **Figura 4.8** ilustra a matriz com o ranque de importância por espécie baseado em valores SHAP, que confirma que as meta-variáveis LOGO grupo das respectivas espécies foram sempre ranqueadas em primeiro. No caso de *T.truncatus*, houve maior variação no ranque de importância entre rodadas do modelo, mas as meta-variáveis do LOGO grupo de *S.attenuata*, *S.longirostris* e *S.clymene* no geral foram melhor ranqueadas do que a meta-variável LOGO grupo da própria espécie. *T.truncatus* foi a única espécie em que isto foi observado, e sugere que a distribuição de erros dos grupos de *T.truncatus* confundidos com *S.attenuata*, *S.longirostris* e *S.clymene* são informações importantes para classificar a espécie. Para as meta-variáveis ao nível individual, k-fold para *S.clymene* e *S.bredanensis* estiveram bem ranqueadas, sugerindo que as informações dos classificadores de assovios ao nível individual também foram importantes para estas espécies.



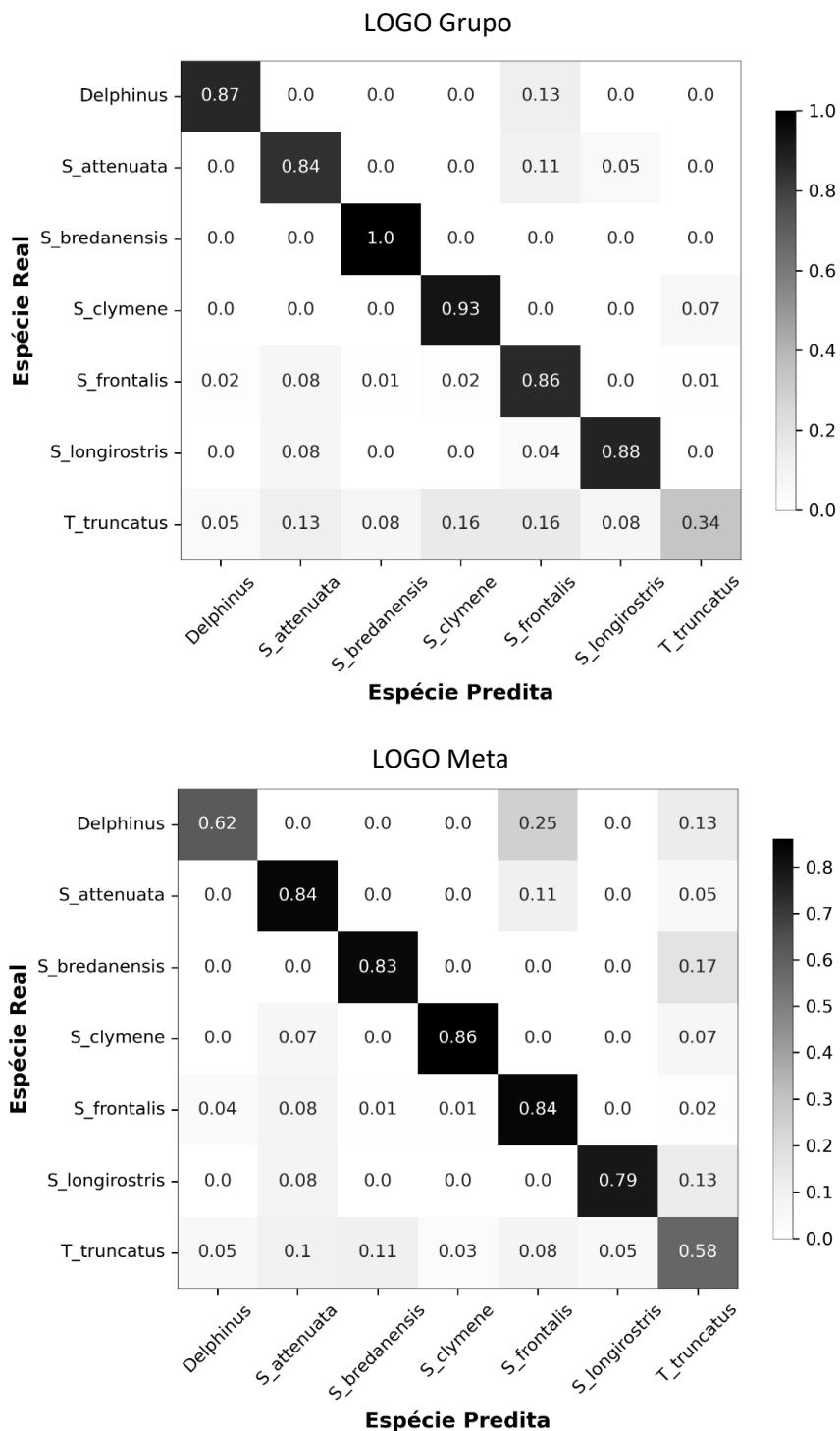
**Figura 4.7** - Importância global das meta-variáveis para o meta-classificador de assovios de delfinídeos da Bacia de Santos pelo método de permutação. Siglas se referem as meta-variáveis de probabilidade de distribuição de cada espécie obtidos dos modelos de base LOGO grupo, LOGO ind e k-fold.



**Figura 4.8** - Importância das meta-variáveis por espécie para o meta-classificador de assovios de delfinídeos da Bacia de Santos, calculado a partir de valores SHAP (algoritmo TreeSHAP). Escala de cores e valores na matriz indicam a posição das meta-variáveis no ranqueamento entre as espécies. As meta-variáveis correspondem a distribuição de probabilidades dos modelos de base (k-FOLD, LOGO individual e LOGO grupo).

#### 4.2.6 Matriz de confusão

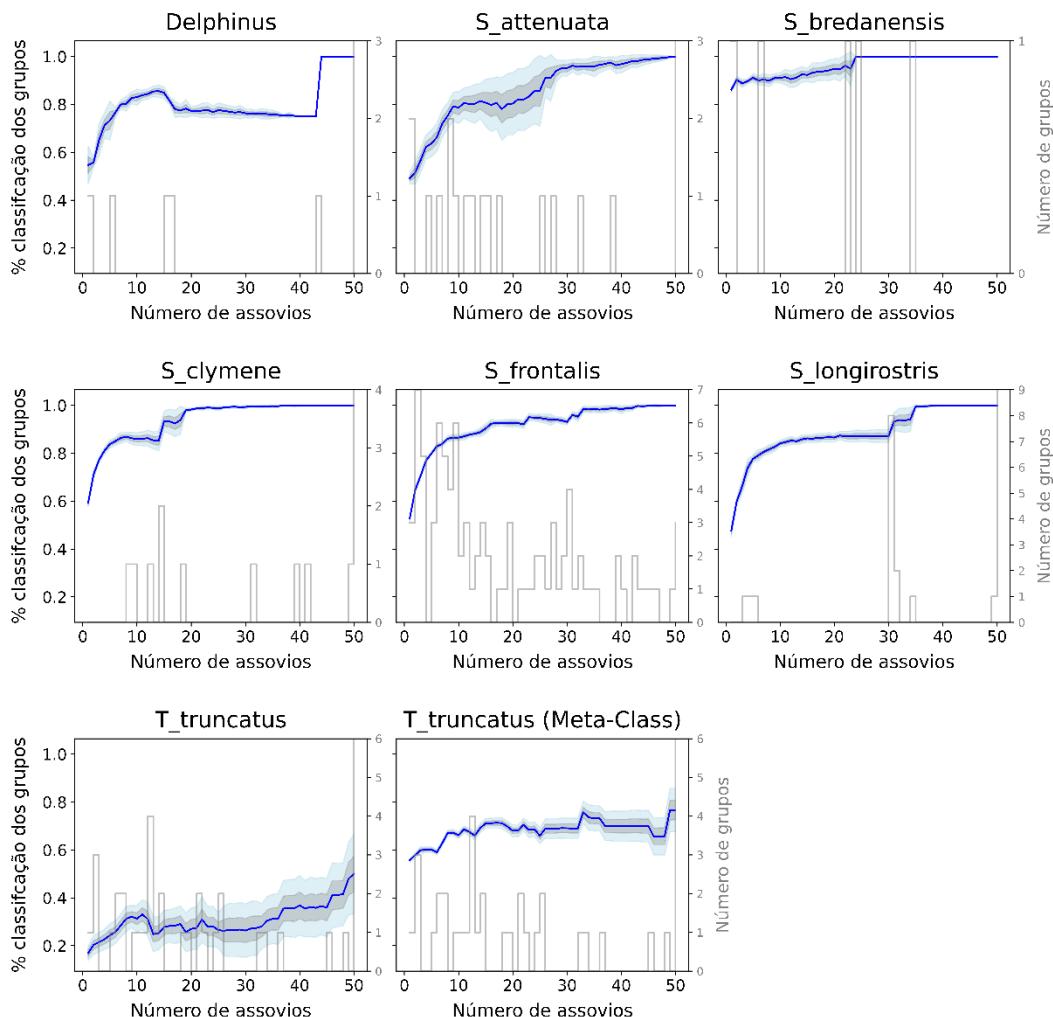
As matrizes de confusão oferecem uma visão mais detalhada do comportamento dos modelos entre as diferenças espécies (**Figura 4.9**). Os resultados são de uma única rodada do LOGO grupo e LOGO meta, escolhido entre aqueles que mais se aproximaram das médias observadas (**Tabela 4.2**). É notável na comparação entre ambos a melhora do meta-classificador na acurácia de *T.truncatus* (de 34% para 58%). Os falsos negativos da espécie diminuíram bastante (melhora na sensibilidade), principalmente na confusão com espécies como *S.clymene* e *S.frontalis*, porém ao custo de um aumento de falsos positivos para outras espécies, particularmente para *S.bredanensis* (17% dos grupos classificados incorretamente como *T.truncatus*), como também *D.delphis* e *S.longirostris* (13% cada). Para *D.delphis*, além da maior confusão com *T.truncatus*, uma das razões para a piora no meta-classificador foi a maior confusão com *S.frontalis* (25% dos grupos de *D.delphis* confundidos com *S.frontalis*). No geral os modelos se complementam, pois a melhor sensibilidade foi para o LOGO grupo para todas as espécies, com exceção de *T.truncatus* que teve um desempenho muito ruim, mas alcançou um valor razoável no meta-classificador.



**Figura 4.9** - Comparação das matrizes de confusão dos modelos de floresta aleatória para classificação de grupos de sete espécies de delfinídeos na Bacia de Santos. Acima o classificador de base LOGO grupo e abaixo o meta-classificador LOGO meta, gerado a partir dos resultados de três resultados de validação, k-fold, LOGO ind e LOGO grupo. Os testes são feitos separando um evento acústico dos demais, os dados são então treinados em amostras balanceadas entre a espécies e o evento deixado de fora é testado. O processo é repetido até que todos os eventos sejam testados. A classificação de eventos contabiliza todas árvores do conjunto de assovios pertencente ao evento e gera uma única distribuição de probabilidades para a classificação. Na diagonal da matriz estão os valores das taxas de acerto (acurácia) para cada uma das sete espécies.

#### 4.2.7 Classificação dos eventos acústicos por número de assovios

Os resultados da validação cruzada LOGO foram utilizados para avaliar a taxa de acerto da classificação de eventos acústicos em função do número de assovios. Os eventos foram amostrados com 1 até o máximo de 50 assovios (média de 100 repetições de amostragens aleatórias). Isto foi feito para os resultados das cinco rodadas do modelo. Houve uma clara tendência de aumento na proporção de eventos acústicos corretamente classificados com o maior número de assovios, ainda que com diferenças entre as espécies (**Figura 4.10**). As curvas apresentam uma forte inclinação inicial, até aproximadamente 10 assovios, seguida de um aumento mais gradual até cerca de 20 a 30 assovios, alcançando cerca de 80% eventos corretamente classificados. A partir de 40 a 50 assovios, observa-se uma maior estabilidade, com resultados mais consistentes. Este padrão ficou mais evidente em *S.clymeme*, *S.frontalis* e *S.longirostris*. As mudanças abruptas e os efeitos de platô observados em algumas curvas estão relacionados ao número limitado de eventos e assovios disponíveis em contagens mais altas, especialmente nas espécies com menor número de amostras de eventos e assovios. O eixo y à direita da **Figura 4.10** mostra a distribuição dos eventos acústicos em função do número de assovios. Essa distribuição foi esparsa para a maioria das espécies. O caso mais extremo foi o de *D.delphis*, com apenas dois eventos apresentando mais de 40 assovios, enquanto os demais tinham menos de 20 assovios. Para *S.bredanensis*, a curva parece estabilizar com um número menor de assovios (pouco acima de 20), embora os resultados se baseiem em poucos eventos. *S.attenuata* também exibiu uma tendência de crescimento, mas com maior variabilidade, especialmente entre os valores de 10 a 30 assovios. Por fim, *T.truncatus*, apresentou uma curva mais suave, taxas de acerto mais baixas com bastante variabilidade e uma leve tendência de crescimento após cerca de 40 assovios. Nos resultados de *T.truncatus* para o meta-classificador (último painel da **Figura 4.10**), houve uma melhora, mas a curva continuou pouco acentuada.



**Figura 4.10** - Proporção de eventos acústicos (grupos) corretamente classificados em função do número de assovios para diferentes espécies de delfinídeos da Bacia de Santos (validação LOGO grupo). A área sombreada em cinza representa o erro padrão entre cinco rodadas do modelo e em azul o desvio padrão de 100 repetições de amostras aleatórias por evento. O gráfico em escada com os degraus em cinza claro representa o número de eventos acústicos (número de grupos no eixo y a direita) em relação ao número de assovios (eixo x). No último gráfico mais abaixo a direita o resultado do meta-classificador para *T.truncatus* (Meta-Class).

### 4.3 DISCUSSÃO

A classificação de espécies animais através de suas vocalizações é um passo fundamental para as aplicações do monitoramento acústico passivo em estudos ecológicos. No caso dos golfinhos (cetáceos membros da família dos delfinídeos), são muitas espécies que produzem um variado repertório de assobios, frequentemente com sobreposição de características. Esta variabilidade, tanto no nível intraespecífico como interespecífico, torna a classificação das espécies uma tarefa complexa (OSWALD *et al.*, 2003, 2007; GANNIER *et al.*, 2010). Um fator importante destes classificadores é a necessidade que sejam constituídos com base nas espécies de uma área geográfica específica, uma vez que as vocalizações das espécies apresentam diferenças geográficas (HAWKINS *et al.*, 2010; PAPALE *et al.*, 2013; LIMA *et al.*, 2020; DONG *et al.*, 2021). Os resultados do classificador acústico de assobios, baseado em sete espécies de cetáceos de pequenos a médio porte que habitam a região da Bacia de Santos, ilustra os desafios para realizar tal tarefa. Diferentes estratégias de treinamento e teste da base de dados foram aplicadas e um meta-classificador foi desenvolvido para lidar com espécies difíceis de serem classificadas. As taxas de acerto obtidas para assobios individuais foram semelhantes às observadas em estudos anteriores. Os primeiros estudos voltados à classificação dos assobios registraram taxas de acerto entre 55% e 65%, utilizando análise discriminante (WANG; WÜRSIG; EVANS, 1995; RENDELL *et al.*, 1999). Esses estudos, porém, utilizaram dados de diferentes regiões, o que dificulta isolar os efeitos das variações geográficas nos resultados. Outros estudos baseados em dados de áreas geográficas específicas, alcançaram até 70% de acerto na classificação de assobios individuais. Esses resultados foram obtidos com o uso de algoritmos como floresta aleatória, árvores de decisão ou análise discriminante, além de diferentes abordagens para extração de variáveis, sejam elas manuais ou automáticas (OSWALD *et al.*, 2003, 2007; GILLESPIE *et al.*, 2013; AZZOLIM *et al.*, 2014; RAKING *et al.*, 2017; AMORIM *et al.*, 2019). O contexto prático da aplicação de classificadores, que reproduz de forma mais realista a coleta de dados bioacústicos de golfinhos em campo, deve partir do princípio que os grupos são unidades indivisíveis, o que inclusive possibilita a classificação ao nível do grupo (denominado de evento acústico). A classificação de eventos acústicos, ao invés dos assobios individuais, aumentou o desempenho do classificador. Na validação cruzada do tipo "deixar-um-

grupo-de-fora" (LOGO) na classificação ao nível de evento acústico a acurácia balanceada alcançou 80%. A avaliação de desempenho através da acurácia balanceada é mais adequada para dados de teste desbalanceados, como no caso deste estudo. A desproporção entre as espécies foi superior a 10 vezes, com *S.frontalis* representando a maioria (1.767 amostras e 95 grupos), e *S.bredanensis* a minoria (139 amostras e 6 grupos). Essa assimetria reflete a composição do banco de dados, construído a partir de cruzeiros sistemáticos ao longo de transectos lineares, onde a proporção de registros acompanha a frequência de encontros com as espécies. Esse desbalanceamento acentuado faz com que as espécies majoritárias introduzam muitos verdadeiros negativos nas classificações das espécies minoritárias, reduzindo o peso relativo dos verdadeiros positivos e falsos positivos. Como consequência, a acurácia torna-se uma métrica menos robusta, levando, inclusive, à convergência entre os valores da acurácia por espécie e da sensibilidade. Isto não é um problema desde que métricas globais como a acurácia balanceada e a média ponderada do F1-score sejam levadas em consideração, pois são mais robustas ao desbalanceamento e oferecem resultados mais confiáveis. Para as métricas individuais, a sensibilidade pode ser vista como a mais confiável, uma vez que os cálculos incluem apenas os verdadeiros positivos, sem incluir a grande quantidade de verdadeiros negativos provindos das classes majoritárias. Em outras palavras, a sensibilidade mede exclusivamente a capacidade do classificador de identificar corretamente os assovios positivos de cada espécie, o que é mais relevante em contextos de dados de teste desbalanceados. Foi observada que a acurácia balanceada foi maior do que a acurácia tradicional, o que indica que o modelo lidou bem com as classes minoritárias (em teoria mais difíceis de prever por terem proporcionalmente menos amostras). A média ponderada do F1-score também apontou para um bom desempenho do modelo (75%). O treinamento com dados balanceados foi essencial para garantir que o modelo fosse mais equitativo e que a acurácia balanceada apresentasse um resultado melhor. O balanceamento duramente o treinamento forçou o modelo a aprender as características de todas as espécies de maneira uniforme. Mesmo para condições de teste desbalanceadas, foi demonstrado um bom desempenho do classificador pela acurácia balanceada. Quando observada a sensibilidade individual de cada espécie, a maior parte atingiu valores entre 80 a 100%. A análise da importância global das variáveis para o modelo apontou que as variáveis de frequência (frequência máxima, média, mediana) e da inclinação

média absoluta do contorno dos assovios foram as que melhor distinguiram as espécies. A inclinação média absoluta está correlacionada negativamente com o percentual de frequência plana dos assovios, que também esteve entre as variáveis melhor ranqueadas. Dado o grande número de variáveis utilizadas é improvável que a adição de novas variáveis dos assovios tem algum efeito na discriminação das espécies. Os resultados dos valores SHAP apontam que quando analisadas em conjunto, mesmo variáveis redundantes foram importantes como um todo para o poder preditivo do modelo, ainda que determinadas variáveis fossem mais importantes para certas espécies em contrapartida de outras.

A classificação em nível de evento acústico permitiu ao modelo aprender padrões mais robustos e menos sensíveis às particularidades dos dados de treino. No entanto, para *T.truncatus*, espécie que já apresentava desempenho inferior na classificação individual de assovios, a sensibilidade permaneceu baixa mesmo na abordagem por grupos, atingindo apenas 31%. *T.truncatus* é uma espécie de golfinho amplamente distribuída em habitats tropicais a temperados em todo o mundo, ocorrendo tanto em águas costeiras quanto oceânicas. Está entre as espécies de golfinhos mais bem estudadas (WELLS; SCOTT, 2018) e apresenta diferentes morfotipos, além de elevada plasticidade comportamental nas distintas regiões onde ocorre, incluindo o uso de ferramentas e estratégias alimentares complexas (SMOLKER et al., 1997; DUFFY-ECHEVARRIA et al., 2008; DAURA-JORGE et al., 2012; ENGELBY & POWELL, 2019). Mesmo dentro de uma mesma população, é possível observar uma grande variedade de comportamentos e estratégias entre grupos e indivíduos (SARGEANT; MANN, 2009). Nas águas da região Sul do Brasil, que inclui parte da área deste estudo, ocorrem dois ecótipos de *T.truncatus*: um costeiro, que habita canais e lagoas, e outro oceânico, com distribuição mais ampla, abrangendo tanto águas costeiras quanto marinhas abertas. Atualmente, esses ecótipos são reconhecidos como subespécies distintas e apresentam uma estreita zona de simpatria na costa sul do Brasil (COSTA et al., 2016; SIMÕES-LOPES et al., 2019; COMMITTEE ON TAXONOMY, 2024). Neste estudo, foi registrado apenas o ecótipo oceânico, com a maioria dos registros em águas rasas, mas também em ambientes oceânicos. A dinâmica espacial e social do ecótipo oceânico não é bem conhecida. Outro aspecto relevante de *T.truncatus* é o componente cultural que influencia seu repertório acústico. A espécie é conhecida pela presença de assovios-assinatura, sinais acústicos individualmente distintos usados na identificação entre

membros do grupo social (JANICK; SAYIGH ; WELLS, 2006). Esses assovios podem representar de 38% a 70% do repertório vocal de um indivíduo (JANIK ; SAYGH, 2013). Essas características podem contribuir para uma maior heterogeneidade dos assovios, tanto entre indivíduos quanto entre grupos, dificultando a classificação da espécie. Nesse contexto, grupos com maior interação entre si tenderiam a apresentar repertórios mais similares. É importante ressaltar que os assovios selecionados para a base de dados do classificador apresentado seguiram apenas critérios de qualidade, sem evitar a inclusão de assovios estereotipados que por ventura estiveram presentes nas gravações. Um estudo mais aprofundado dos assovios da espécie, aliado a dados de foto-identificação e à comparação entre os repertórios dos diferentes grupos, poderia contribuir para o aprimoramento do classificador; por exemplo, criando subcategorias dentro da espécie para alimentar o modelo, de modo a refletir subconjuntos de dados presumivelmente representativos de diferentes subunidades populacionais. Oswald et al. (2021), por exemplo, analisou assovios de duas espécies simpátricas de golfinho-comum (*Delphinus*) na Califórnia, previamente conhecidas por serem difíceis de serem classificadas. Utilizando um algoritmo de rede neural e aprendizado não supervisionado, os autores agruparam o repertório de assovios em categorias ou tipos com base no contorno dos assovios. A análise revelou que assovios com modulações de frequência oscilatória estavam predominantemente presentes em uma das espécies, o que favoreceu a separação entre elas. Em outro estudo no Pacífico Leste Tropical, a comparação dos assovios entre um ecótipo costeiro e oceânico de *S.attenuata*, foi demonstrado diferenças nas características e tipos de assovios presentes no repertório, que resultou num classificador com uma boa acurácia para diferenciar os ecótipos (REGE-COLT et al., 2023). Uma solução adotada para permitir que o classificador aprendesse características ao nível dos grupos de *T.truncatus* foi a aplicação de um meta-classificador. A sensibilidade para *T.truncatus* aumentou, passando de 31% no classificador base para 57% no meta-classificador. Esse ganho sugere que os padrões de erro dos classificadores de base carregam informações relevantes para a identificação da espécie. Em contraste, para as demais espécies, as pontuações de sensibilidade foram semelhantes ou até inferiores às obtidas com o classificador base.

A análise de desempenho do classificador em relação ao número de assovios por evento acústico forneceu informações relevantes para a sua aplicação prática. De maneira geral, a acurácia do classificador melhorou significativamente a partir de 20

a 30 assovios, com cerca de 80% ou mais dos grupos sendo corretamente classificados. Vale destacar que as simulações com grupos contendo maior quantidade de assovios se basearam em um número reduzido de grupos testados, mas ainda assim, a tendência de melhoria foi evidente à medida que o número de assovios aumentou. Variações entre as espécies foram observadas, sendo que os resultados para as espécies que tiveram um número menor de eventos e assovios testados devem ser interpretados com cautela. A exceção a esse padrão foi *T.truncatus*, que apresentou uma curva de desempenho que não seguiu a tendência geral. Mesmo com o uso do meta-classificador a curva permaneceu relativamente estável entre as diferentes contagens de assovios.

Algumas espécies de delfinídeos que foram registradas na Bacia de Santos não foram incluídas no classificador de assovios. Entre estas estão espécies que foram frequentemente registradas durante os levantamentos, mas apresentaram produção limitada de assovios, como a orca (*Orcinus orca*), a baleias-piloto (*Globicephala* spp.) e os golfinho-de-risso (*Grampus griseus*). Outras espécies menos frequentes, como as falsas-orcas (*Pseudorca crassidens*), as orca-pigméia (*Feresa attenuata*) e o golfinho-cabeça-de-melão (*Peponocephala electra*), tiveram uma produção de assovios mais consistente, mas com tamanho de amostra reduzido (poucos eventos acústicos registrados). Algumas dessas espécies são de maior porte e tendem a produzir assovios com a frequência máxima mais baixa (OSWALD et al., 2007). O algoritmo de floresta aleatória é reconhecidamente robusto à adição de novas classes e pode adaptar-se redistribuindo a importância das variáveis preditoras. É possível, que no caso de inclusão de outras espécies que produzam assovios com frequência máxima mais baixa, esta variável deixe de ser um critério determinante para a classificação de *S.bredanensis*, sendo substituída por outras variáveis mais discriminativas no novo conjunto de decisões. Ressalta-se, contudo, que a inclusão efetiva dessas espécies exige uma representatividade adequada de amostras, uma vez que a introdução de espécies com poucos eventos e número limitado de assovios pode comprometer a acurácia global do modelo.

Outro desafio é como lidar com grupos mistos de espécies. A base de dados disponível conta com gravações de grupos mistos que não foram incluídas nas análises. As associações entre espécies parecem ser mais comuns entre certas espécies do que outras (LIMA et al., 2021). Essas informações podem direcionar esforços para treinar modelos para as associações mais frequentes e aplicação da

abordagem do meta-classificador para identificar padrões nas distribuições de probabilidades, o que pode auxiliar no aprendizado do classificador para identificar estes grupos mistos. Ainda assim é necessário entender a dinâmica do comportamento vocal das espécies envolvidas, pois é possível que as vocalizações de uma espécie possam predominar sobre a outra ou até mesmo os assovios se modifiquem durante estas interações (MAY-COLLADO et al., 2010; RAKING et al., 2017; VIANA et al., 2022). Uma estratégia interessante é a inclusão de outros tipos de vocalizações nos classificadores. Golfinhos e odontocetos no geral, produzem cliques de ecolocalização que também podem ser utilizados para classificação (ROCH et al., 2011). Assim como os assovios, os cliques de delfinídeos se assemelham entre si, porém para algumas espécies já foi demonstrado que padrões de picos e vales dos cliques contém informações espécie-específicas (SOLDEVILLA et al. 2008). São poucos os estudos que desenvolveram classificadores que combinam os assovios e cliques (LU; MELLINGER; KLINCK., 2013; RAKING et al. 2017; AMORIM et al., 2019; MCCULLOUGH et al., 2021) e os resultados mostram que a classificação individual dos assovios ou cliques no geral é mais baixa, mas melhora com a combinação de ambos. O método proposto por Raking et al. (2017), conhecido como Bio-Acoustic eveNT classifiER (BANTER), combinou as distribuições de probabilidade geradas por modelos de base (para assovios, cliques e sons pulsados) em um meta-classificador. Esse mesmo conceito pode ser adaptado aos nossos dados, permitindo a inclusão dos cliques que eventualmente tenham sido registrados em conjunto com os assovios.

Por último, o uso de técnicas de aprendizado profundo tem se expandido rapidamente na bioacústica. Classificadores baseados em redes neurais convolucionais (CNNs) têm sido amplamente empregados para vocalizações de misticetos, devido à natureza mais estereotipada desses sinais (SHIU et al., 2020; RASMUSSEN et al., 2021; ALLEN et al., 2021). No entanto, aplicações bem-sucedidas também já foram demonstradas para odontocetos, incluindo assovios e cliques de delfinídeos (BERGLER et al., 2019; FREINER et al., 2023). Essas abordagens possibilitam a automação necessária para lidar com grandes volumes de dados, sendo uma tendência crescente e cada vez mais acessível (BIANCO et al., 2019). Apesar disso, modelos baseados em floresta aleatória seguem como uma alternativa eficiente, especialmente em cenários com dados limitados, apresentando desempenho competitivo sem a necessidade de grandes volumes de amostras para treinamento. Em contrapartida, os dados utilizados em modelos de floresta aleatória

precisam estar estruturados em formato tabular, o que pode demandar desde etapas manuais de processamento até diferentes níveis de automação. Uma vantagem importante desse tipo de modelo está na sua implementação relativamente simples e na facilidade de interpretação, permitindo análises sob uma perspectiva biológica e evolutiva das espécies por meio da avaliação da importância das variáveis. Além disso, os modelos de floresta aleatória oferecem flexibilidade para integração de múltiplos conjuntos de dados e combinações de modelos. Um exemplo é a adaptação feita por Raking et al. (2024), que utilizaram o algoritmo originalmente proposto no BANTER, desenvolvido para combinar classificadores de diferentes tipos de vocalizações de golfinhos, na classificação de cliques de ecolocalização de baleias-bicudas, integrando os resultados provenientes de múltiplos detectores automáticos para a identificação de eventos acústicos.

#### 4.4 CONCLUSÕES

Dada a complexidade e o desafio de desenvolver um classificador de espécies de golfinhos envolvendo uma grande diversidade de espécies com sinais acústicos similares, os resultados apresentados foram satisfatórios para a maioria das espécies. Para algumas delas, como *S.bredanensis*, *D.delphis* e *S.attenuata*, a precisão mais baixa indica que ainda há espaço para melhorias, e que o classificador pode se beneficiar da inclusão de novos dados dessas espécies no treinamento. No caso de *T.truncatus*, apesar da boa representatividade em termos de eventos acústicos e assavios, uma aparente maior heterogeneidade dos dados, tanto no nível individual quanto entre eventos da espécie, impediu que o classificador alcançasse melhores desempenhos. Uma análise mais detalhada, que permita identificar os grupos dentro do contexto da dinâmica espacial e social da espécie na região, pode contribuir para o desenvolvimento de classificadores mais específicos, aumentando a confiabilidade na identificação dessa espécie.

A abordagem proposta neste estudo integra múltiplas estratégias e foi projetada para equilibrar acurácia, sensibilidade e robustez em cenários do mundo real, onde cada amostra de teste geralmente corresponde a um conjunto de assavios de um único evento acústico, que por sua vez corresponde a um grupo de cetáceos detectados em campo. Com base nos resultados, propomos um fluxo de trabalho para a classificação de espécies a partir de detecções de assavios de golfinhos:

- 1) Pré-processamento** Os assavios devem ser primeiramente selecionados utilizando critérios de qualidade bem definidos e processados através do módulo ROCCA do PAMGuard (OSWALD & OSWALD, 2013) para extrair contornos de frequência e derivar as características preditoras (44 variáveis).
- 2) Teste em classificadores de base:** as amostras processadas devem ser testadas utilizando os modelos previamente treinados (cinco execuções com seus respectivos valores de “random state” e hiperparâmetros ótimos). Os modelos utilizam diferentes estratégias de validação e classificação (a) k-fold e (b) LOGO ind, que gera resultados de classificação no nível individual e (c) LOGO grupo que gera resultados no nível de eventos acústicos.

Recomendamos aplicar pelo menos três classificadores base complementares:

- Um k-fold padrão ( $k=5$ )
- Um modelo “Leave-One-Group-Out” (LOGO) que produz previsões em nível individual (LOGO ind)
- Um modelo LOGO usando votação em nível de evento (LOGO grupo)

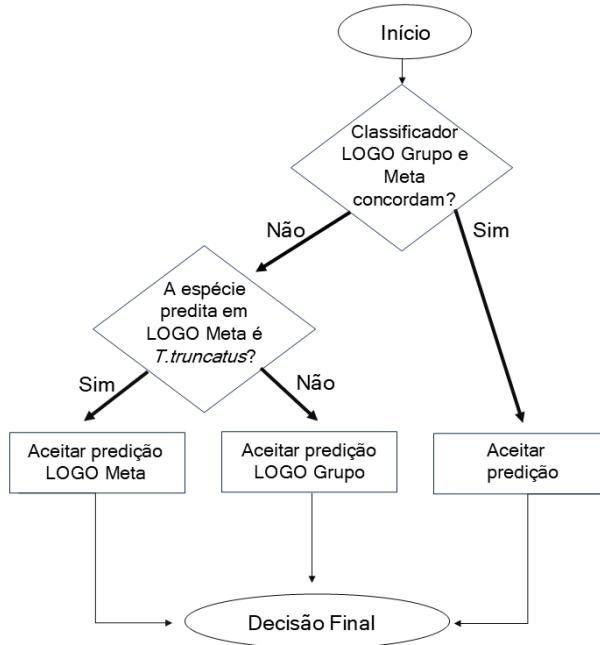
Cada classificador deve ser executado várias vezes com diferentes fatores de randomização e hiperparâmetros otimizados, e as saídas de probabilidade resultantes devem ser as médias entre as execuções para melhorar a estabilidade. O modelo padrão k-fold permite vazamento de dados em grupo (assovios provenientes do mesmo evento acústico podem aparecer tanto nos conjuntos de treino quanto de validação), mas a previsão final para novos dados seria feita em eventos totalmente inéditos, um cenário de avaliação muito mais rigoroso do que qualquer utilizado na validação. Isso torna nossa configuração de teste final mais conservadora do que a validação k-fold e evita qualquer viés do desempenho preditivo devido ao vazamento de dados. Para o modelo LOGO, por outro lado, a validação cruzada reflete fielmente a estrutura dos dados não vistos, pois garante que os dados de treino e teste pertençam a eventos acústicos distintos.

**3) Meta-classificador:** As distribuições de probabilidade médias de todos os classificadores base pode ser concatenadas para formar um conjunto de meta-variáveis. Essas meta-variáveis são então utilizadas para treinar um meta-classificador para previsões ao nível do evento acústico ao nível, que demonstrou resolver conflitos de classificação e aumentar significativamente a sensibilidade para espécies com desempenho inferior, como *Tursiops truncatus*.

**4) Regras Finais de Decisão:** para melhorar a confiabilidade da classificação, sugerimos adotar uma estratégia de decisão híbrida (**Figura 4.11**) baseada no comportamento empírico dos modelos:

- Quando a classificação do modelo LOGO grupo e o meta-classificador (LOGO meta) concordam, a previsão compartilhada é aceita.

- Em casos de desacordo: se espécie predita pelo meta-classificador for *Tursiops truncatus* a previsão é aceita. Para todas as outras espécies a previsão do LOGO grupo é mantida.



**Figura 4.11** Fluxograma que define as regras finais de predição através da integração de modelos de classificadores de assovios para sete espécies de delfinídeos da Bacia de Santos. A previsão é feita comparando-se as previsões do classificador de base LOGO grupo e o meta-classificador LOGO meta.

Essa lógica de decisão reflete os pontos fortes complementares observados nos modelos: o classificador de eventos LOGO geralmente obteve maior sensibilidade para a maioria das espécies, enquanto o meta-classificador foi melhor na predição de eventos de *T. truncatus*, que foram mais frequentemente classificados incorretamente pelos modelos de base. Como a tarefa enfatiza a identificação em nível de evento, as regras finais de decisão priorizam a métrica de sensibilidade para minimizar os falsos negativos. O uso da validação cruzada k-fold permitindo o vazamento de assovios entre os eventos acústicos pode inflar os resultados de desempenho. No entanto, a análise de importância das meta-variáveis revelou que o meta-classificador não confiou excessivamente nas previsões k-fold e tendeu a subestimá-las onde eram inconsistentes ou menos confiáveis. Se o meta-classificador não conseguir generalizar para certas espécies, isso provavelmente refletirá a dificuldade intrínseca dessas espécies e as limitações das suposições do modelo atual, e não falhas no

delineamento da validação. Os resultados reforçam o valor das previsões em nível de evento e sugerem que um mínimo de 20 a 30 assovios podem ser necessários para garantir um desempenho robusto em aplicações práticas.

A identificação taxonômica dos sons biológicos é essencial para a implementação eficaz de técnicas de MAP. A aplicação dessas técnicas depende da capacidade de associar corretamente as vocalizações às respectivas espécies, o que permite investigar padrões de distribuição, índices de abundância e subsidiar o desenvolvimento de estratégias de manejo, conservação e avaliação de impactos ambientais (WEBBER et al., 2022; FLEISHMAN et al., 2023). A classificação acústica também pode revelar variações geográficas e ajudar nos estudos de conectividade entre subpopulações (PAPALE et al., 2014). O classificador de assovios aqui proposto tem potencial aplicação em pesquisas científicas e em programas de monitoramento ambiental exigidos por órgãos reguladores. Seu uso pode ser integrado a dados provenientes de diversas plataformas, como gravadores fixos autônomos, cabos rebocados por embarcações ou veículos autônomos não tripulados, iniciativas já em curso na Bacia de Santos (DALPAZ et al., 2021; LIMA et al., 2024). Embora a implementação atual tenha sido testada no contexto de um monitoramento de longo prazo de múltiplas espécies de cetáceos na Bacia de Santos, a metodologia e a abordagem são amplamente aplicáveis e podem ser adaptadas para uso em outras regiões para dar suporte ao estudo ecológico e à conservação de delfinídeos em diferentes ambientes marinhos.

## REFERÊNCIAS

- ALLEN, Ann N. et al. A convolutional neural network for automated detection of humpback whale song in a diverse, long-term passive acoustic dataset. **Frontiers in Marine Science**, v. 8, p. 607321, 2021.
- AMORIM, Thiago O. S. et al. Integrative bioacoustics discrimination of eight delphinid species in the western South Atlantic Ocean. **PLoS One**, 14(6), e0217977, 2019.
- AZZOLIN, M. et al. Combining whistle acoustic parameters to discriminate Mediterranean odontocetes during passive acoustic monitoring. **Journal of the Acoustic Society of America**, 135(1): 502-512, 2014.
- BERGLER, Christian et al. ORCA-SPOT: An automatic killer whale sound detection toolkit using deep learning. **Scientific reports**, v. 9, n. 1, p. 10997, 2019.
- BIANCO, Michael J. et al. Machine learning in acoustics: Theory and applications. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 146, n. 5, p. 3590-3628, 2019.
- COMMITTEE ON TAXONOMY. 2024. List of marine mammal species and subspecies. **Society for Marine Mammalogy**, [www.marinemammalscience.org](http://www.marinemammalscience.org), acessado em: 20/09/2024.
- COSTA, Ana P.B. et al. Offshore and coastal common bottlenose dolphins of the western South Atlantic face-to-face: What the skull and the spine can tell us. **Marine Mammal Science**, v. 32, n. 4, p. 1433-1457, 2016.
- DALPAZ, L. et al. Better together: analysis of integrated acoustic and visual methods when surveying a cetacean community. **Marine Ecology Progress Series**, v. 678, p. 197-209, 2021.
- DAURA-JORGE, F. G. et al. The structure of a bottlenose dolphin society is coupled to a unique foraging cooperation with artisanal fishermen. **Biology Letters**, v. 8, n. 5, p. 702-705, 2012.
- DONG, Lijun et al. Whistle characteristics of a newly recorded Indo-Pacific humpback dolphin (*Sousa chinensis*) population in waters southwest of Hainan Island, China, differ from other humpback dolphin populations. **Marine Mammal Science**, v. 37, n. 4, p. 1341-1362, 2021.
- DUFFY-ECHEVARRIA, Erin E. et al. Observations of strand-feeding behavior by bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) in Bull Creek, South Carolina. **Marine Mammal Science**, v. 24, n. 1, 2008.
- ENGLEBY, Laura K.; POWELL, Jessica R. Detailed observations and mechanisms of mud ring feeding by common bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus truncatus*) in Florida Bay, Florida, USA. **Marine Mammal Science**, v. 35, n. 3, 2019.
- FLEISHMAN, Erica, et al. Ecological inferences about marine mammals from passive acoustic data. **Biological Reviews**, v. 98, p. 1633-1647, 2023

FRAINER, Guilherme et al. Automatic detection and taxonomic identification of dolphin vocalisations using convolutional neural networks for passive acoustic monitoring. **Ecological Informatics**, v. 78, p. 102291, 2023.

GANNIER, Alexandre et al. Performance of a contour-based classification method for whistles of mediterranean delphinids. **Applied Acoustics**, v. 71, n. 11, p. 1063-1069, 2010.

GILLESPIE, Douglas, et al. Automatic detection and classification of odontocete whistles. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 134, n. 3, p. 2427-2437, 2013.

HAWKINS, Elizabeth R. et al. Geographic variations in the whistles of bottlenose dolphins (*Tursiops aduncus*) along the east and west coasts of Australia. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 128, n. 2, p. 924-935, 2010.

JANIK, Vincent M.; SAYIGH, Laela S.; WELLS, Randall S. Signature whistle shape conveys identity information to bottlenose dolphins. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 103, n. 21, p. 8293-8297, 2006.

JANIK, Vincent M.; SAYIGH, Laela S. Communication in bottlenose dolphins: 50 years of signature whistle research. **Journal of Comparative Physiology A**, v. 199, p. 479-489, 2013.

JANIK, Vincent M. et al. Identifying signature whistles from recordings of groups of unrestrained bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*). **Marine Mammal Science**, v. 29, n. 1, p. 109-122, 2013.

K. LISA YANG CENTER FOR CONSERVATION BIOACOUSTICS AT THE CORNELL LAB OF ORNITHOLOGY. Raven Pro: Interactive Sound Analysis Software (Version 1.6.5) [Computer software]. Ithaca, NY: The Cornell Lab of Ornithology. 2025. Available from <https://www.ravensoundsoftware.com/>.

LIMA, Isabela et al. Geographic variation in the whistles of bottlenose dolphins (*Tursiops spp.*) in the southwestern Atlantic Ocean. **Marine Mammal Science**, v. 36, n. 3, 2020.

LIMA, Renan C. et al. Delphinid Mixed-Species Associations in the Oceanic Waters of the Western South Atlantic. **Aquatic Mammals**, v. 47, n. 1, 2021.

LIMA, José Antonio Moreira et al. The Brazilian Santos basin underwater soundscape monitoring project (PMPAS-BS). **Frontiers in Marine Science**, v. 11, p. 1416590, 2024.

LU, Yang; MELLINGER, David; KLINCK, Holger. Joint classification of whistles and echolocation clicks from odontocetes. In: **Proceedings of Meetings on Acoustics**. AIP Publishing, 2013.

MCCULLOUGH, Jennifer L. K. et al. Acoustic classification of false killer whales in the Hawaiian Islands based on comprehensive vocal repertoire. **JASA Express Letters**, v. 1, n. 7, 071201, 2021.

- MAY-COLLADO, Laura J. Changes in whistle structure of two dolphin species during interspecific associations. **Ethology**, v. 116, n. 11, p. 1065-1074, 2010.
- RANKIN, Shannon et al. Acoustic classification of dolphins in the California Current using whistles, echolocation clicks, and burst pulses. **Marine Mammal Science**, v. 33, n. 2, p. 520–540, 2017.
- SOLDEVILLA, Melissa S. et al. Classification of Risso's and Pacific white-sided dolphins using spectral properties of echolocation clicks. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 124, n. 1, p. 609-624, 2008.
- OSWALD, Julie N.; BARLOW, Jay; NORRIS, Thomas F. Acoustic identification of nine delphinid species in the eastern tropical Pacific Ocean. **Marine Mammal Science**, v. 19, n. 1, p. 20-37, 2003.
- OSWALD, Julie N. et al. A tool for real-time acoustic species identification of delphinid whistles. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 122, n. 1, p. 587-595, 2007.
- OSWALD, Julie N. et al. Species information in whistle frequency modulation patterns of common dolphins. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**. V. 376, n. 1836, p. 20210046, 2021.
- OSWALD, J. N.; OSWALD, M. ROCCA (Real-time Odontocete Call Classification Algorithm) User's Manual. **prepared for Naval Facilities Engineering Command Atlantic, Norfolk, Virginia under HDR Environmental, Operations and Construction, Inc., Contract No. CON005-4394-009, Subproject**, v. 164744, 2013.
- PAPALE, Elena et al. Geographic variability in the acoustic parameters of striped dolphin's (*Stenella coeruleoalba*) whistles. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v.133, n. 2, p.1126-1134, 2013.
- PAPALE, Elena et al. Macro- and micro-geographic variation of short-beaked common dolphins whistles in the Mediterranean Sea and Atlantic Ocean. **Ethology Ecology & Evolution**, v. 26, n. 4, p. 392-404, 2014.
- RASMUSSEN, Jeppe Have; ŠIROVIĆ, Ana. Automatic detection and classification of baleen whale social calls using convolutional neural networks. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 149, n. 5, p. 3635-3644, 2021.
- RANKIN, Shannon et al. Acoustic classification of dolphins in the California Current using whistles, echolocation clicks, and burst pulses. **Marine Mammal Science**, v. 33, n. 2, p. 520–540, 2017.
- RANKIN, Shannon, et al. Open-source machine learning BANTER acoustic classification of beaked whale echolocation pulses. **Ecological Informatics**, v. 80, p. 102511, 2024.
- REGE-COLT, Manali et al. Whistle repertoire and structure reflect ecotype distinction of pantropical spotted dolphins in the Eastern Tropical Pacific. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 13449, 2023.

- RENDELL, Luke. E. et al. Quantitative analysis of tonal calls from five odontocete species, examining interspecific and intraspecific variation. **Journal of Zoology** 249:403-410, 1999.
- ROCH, Marie A. et al. Classification of echolocation clicks from odontocetes in the Southern California Bight. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 129, n. 1, p. 467-475, 2011.
- SARGEANT, Brooke L.; MANN, Janet. Developmental evidence for foraging traditions in wild bottlenose dolphins. **Animal Behaviour**, v. 78, n. 3, p. 715-721, 2009.
- SIMÕES-LOPES, Paulo. C. et al. Bottlenose dolphin ecotypes of the western South Atlantic: the puzzle of habitats, coloration patterns and dorsal fin shapes. **Aquatic Biology**, v. 28, p. 101-111, 2019.
- SMOLKER, Rachel et al. Sponge carrying by dolphins (Delphinidae, *Tursiops* sp.): a foraging specialization involving tool use? **Ethology**, v. 103, n. 6, p. 454-465, 1997.
- SOLDEVILLA, Melissa S. et al. Classification of Risso's and Pacific white-sided dolphins using spectral properties of echolocation clicks. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 124, n. 1, p. 609-624, 2008.
- VIANA, Yasmin et al. Are dolphins modulating whistles in interspecific group contexts? **Bioacoustics**, v. 31, n. 6, p. 668-679, 2022.
- WANG, D., B. WURSIG AND W. EVANS. 1995. Comparisons of whistles among seven odontocete species. In: **Sensory Systems of Aquatic Mammals**. De Spil Publishers, Woerden, The Netherlands, 1995, pg. 299-323.
- WEBBER, Thomas et al. Streamlining analysis methods for large acoustic surveys using automatic detectors with operator validation. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 13, n. 8, p. 1765-1777, 2022.
- WELLS, Randall S.; SCOTT, Michael D. Bottlenose dolphin, *Tursiops truncatus*, common bottlenose dolphin. In: **Encyclopedia of Marine Mammals**. Academic Press, 2018. p. 118-125.

## CAPÍTULO 2

### 5 INTEGRAÇÃO DE CLASSIFICADORES ACÚSTICOS DE ASSOVIO E CLIQUES DE DELFINÍDEOS DA BACIA DE SANTOS

#### 5.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentado o resultado do classificador de cliques de ecolocalização para delfinídeos, em seguida o classificador combinado, que integra os resultados dos classificadores de cliques e dos assovios do capítulo anterior (Capítulo 1 — Classificador acústico de assovios de delfinídeos da Bacia de Santos). Por fim, propõe-se um sistema de classificação que integra múltiplos modelos (assovios, cliques e combinado) por meio da combinação ponderada das probabilidades, explorando os pontos fortes de cada modelo.

##### 5.1.1 Cliques de ecolocalização

O processamento dos cliques de ecolocalização foi feito a partir das gravações coletadas nas campanhas de Avistagem Embarcada e MAP (AEMAP) utilizando o par de alta frequência do arranjo de hidrofones rebocado (taxa de amostragem de 500 kHz). Os dados contêm as gravações associadas às avistagens de espécies confirmadas pela equipe visual. As avistagens estão associadas os grupos de animais detectados acusticamente que formam o conjunto de vocalizações denominada de evento acústico; neste caso as sequências de cliques de ecolocalização, potencialmente produzidas por diferentes indivíduos do grupo avistado. O processamento dos cliques foi feito mantendo a integridade dos eventos acústicos e envolveu uma série de etapas para a detecção automática e extração de variáveis acústicas.

###### 5.1.1.1 Detecção automática dos cliques

Foi utilizado o módulo “Click Train Detector” do software PAMGuard (versão 2.02.10) (GILLESPIE et al., 2008) para a detecção automática dos cliques. Este módulo opera em conjunto com o detector de cliques clássico do PAMGuard. O

algoritmo utilizado no “Click Train Detector”, denominado de “multi hypothesis tracking” (em português “rastreamento de multi-hipóteses”), se propõe a identificar padrões repetitivos de cliques, separando de outros ruídos impulsivos. Durante a ecolocalização os animais emitem cliques em padrões regulares com pequenas variações em parâmetros tais como a amplitude, intervalo-entre-cliques e ângulos de direção. O algoritmo busca por consistência na variação destes parâmetros, considerando um conjunto de hipóteses para possíveis sequências de cliques. Estas variações são inseridas em um modelo de estimador de máxima verossimilhança, que calcula a probabilidade de uma determinada combinação de cliques pertencer a uma fonte biológica. As combinações de sequências de cliques com maior probabilidade são mantidas e as demais descartadas (MACAULAY, 2020).

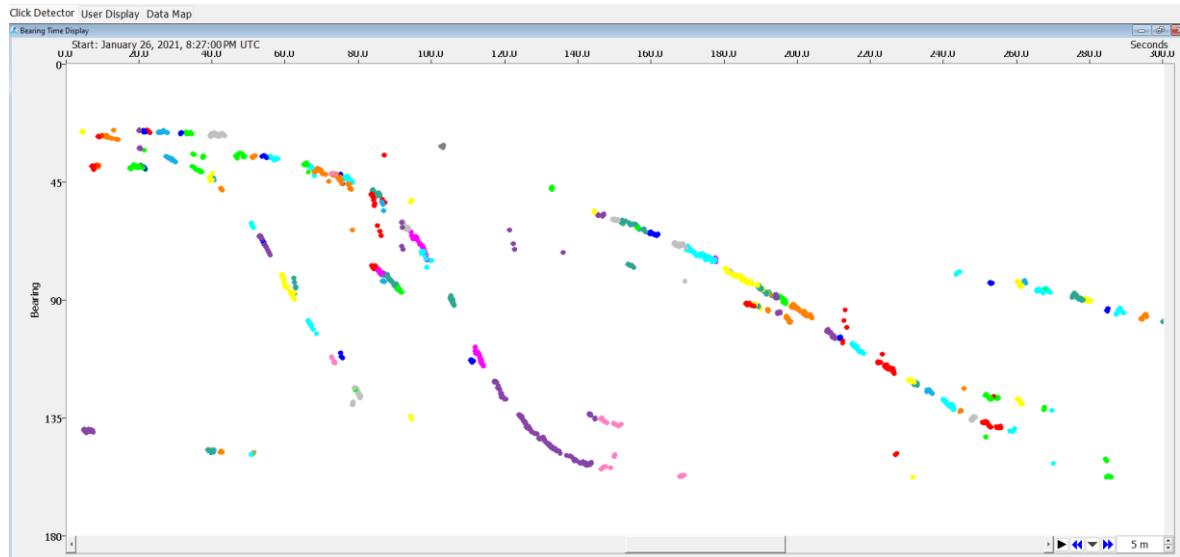
O detector foi configurado com um filtro digital de banda entre 5 a 150 kHz do tipo Butterworth. O limiar de detecção (relação sinal/ruído) foi fixado em 16 dB. Para cada clique o detector extraiu uma janela de 1024 pontos (2 ms) da forma da onda a partir do áudio bruto. As detecções foram armazenadas na forma de dados binários do PAMGuard e arquivos do SQLite. O detector de cliques também calcula os ângulos de direção dos cliques a partir da diferença do tempo de chegada dos sinais entre os dois canais de gravação. A interface gráfica do detector está ilustrada na **Figura 5.1**. Os pontos com diferentes cores no gráfico são os cliques detectados. No eixo x o tempo em segundos e no eixo y os ângulos de direção dos cliques em graus. Os ângulos começam a partir de 0°, o que corresponde ao eixo linear anterior ao hidrofone (proa), o ângulo de 90° é a perpendicular e 180° o eixo linear posterior ao hidrofone (popa). Os ângulos não diferem entre os bordos da embarcação (boreste ou bombordo). O detector de cliques está sujeito a detecção de uma série de falsos positivos, uma vez que outras fontes de ruído transientes também podem apresentar características impulsivas similares aos cliques de ecolocalização. Os mais comuns no ambiente marinho são aqueles provenientes de ruído de cavitação de propulsores de embarcações, instrumentos de batimetria como ecossondas e sons de origem biológica (invertebrados). Ruídos provenientes da própria embarcação, especialmente em ângulos de até 25 graus, foram comuns e constituíram uma fonte relevante de falsos positivos. Para mitigar esse problema, foi implementado um veto no detector para sinais captados em ângulos inferiores a 25 graus.

A vantagem deste tipo de detector é que ele pode lidar com situações complexas, podendo identificar as cadeias de cliques na presença de ruídos

impulsivos de outras fontes ou mesmo quando há sobreposição de cadeias de cliques de diferentes indivíduos. A desvantagem é que a configuração envolve uma série de variáveis que afetam o desempenho, o que exige uma série de tentativas e ajustes para desenvolver uma configuração inicial. Além de detectar sequências de cliques através de modelos probabilísticos, o algoritmo aplica um classificador configurável. O classificador baseia-se em parâmetros como valores estatísticos do intervalo-entre-cliques, número mínimo de cliques de uma cadeia e um limiar de correlação (similaridade) do espectro com um espectro modelo (“template”) da espécie a ser classificada.

Após uma série de testes e ajustes foi feita uma configuração do “Click Train Detector”. Foram feitos diversos ajustes nos parâmetros, como por exemplo, nos valores de poda da matriz de hipóteses, que afetam principalmente o tamanho da matriz e o tempo de computação, sendo necessário encontrar um balanço entre o tempo de execução e o desempenho do detector. Ajustes também foram feitos em variáveis consideradas relevantes para identificar as cadeias de cliques, incluindo o intervalo-entre-cliques, amplitude, ângulo de direção e valores de correlação do espectro entre os cliques. Também foram feitos ajustes em configurações que adicionam um bônus ou penalidade nos valores de máxima verossimilhança, que auxiliam na prevenção da fragmentação excessiva das cadeias, favorecendo cadeias mais longas e prevenindo o “aliasing” (detecção de múltiplos do intervalo-entre-cliques ao invés do valor verdadeiro). No exemplo, os pontos coloridos são as diferentes cadeias de cliques detectados e classificados pelo algoritmo do “Click Train Detector” (**Figura 5.1**).

O “Click Train Detector” também conta com um classificador que foi configurado para identificar cliques característicos de delfinídeos. Na configuração do classificador foi escolhido um modelo “template” de espectro típico de delfinídeos disponível no PAMGuard (denominado “Broadband Dolphin”). O limiar de correlação do espectro modelo foi definido em 0,5. Além do espectro “template” o classificador considerou os valores da mediana do intervalo-entre-cliques, definidos entre 0,001 e 0,5 segundos. O número mínimo de cliques de uma cadeia foi definido em 5 e um mínimo 70% dos cliques da cadeia com classificação positiva.



**Figura 5.1** - Detector de cliques do PAMGuard com aplicação do módulo detector de cadeias (“Click Train Detector”). As cores representam as cadeias de cliques detectadas, no eixo x o tempo (escala de 5 minutos) e no eixo y os ângulos de direção entre 0 e 180 graus. Neste exemplo trecho com detecção de cliques do golfinho-de-dentes-rugosos (*Steno bredanensis*) conforme identificação visual durante a detecção.

#### 5.1.1.2 Extração das variáveis acústicas dos cliques

Os dados binários e arquivos SQLite armazenam as informações das detecções dos detectores do PAMGuard. Primeiramente foi feita a filtragem dos cliques detectados na base de dados SQLite, mantendo apenas as cadeias de cliques classificados como delfinídeos. Em seguida foi utilizado o pacote PAMPal versão 1.0.6 do ambiente de programação R (versão 4.4.3). O pacote oferece uma série de ferramentas para organizar e analisar dados de acústica coletados pelo PAMGuard. Os cliques foram extraídos do primeiro canal do par. Para a extração das variáveis os cliques foram filtrados para frequências entre 10 a 100 kHz e utilizada uma janela de 1024 pontos (2 ms). A partir de então foram extraídas medições dos cliques incluindo 20 diferentes variáveis implementadas no PAMPal, seguindo metodologia descrita em Soldevilla et al. (2008) e Griffiths et. al (2020). Uma lista completa dos parâmetros pode ser encontrada no Apêndice B. A maior parte das variáveis estão relacionadas às características do espectro, medidas em kHz: pico de frequência, picos secundários, largura da banda em -3 dB e -10 dB, entre outros, além do intervalo-entre-cliques em ms, e a duração dos cliques, em  $\mu$ s. Os valores de intervalo-entre-cliques foram obtidos a partir dos cliques individuais detectados e posteriormente filtrados com base nos intervalos típicos reportados delfinídeos, de forma a evitar a inclusão de valores espúrios decorrentes de pausas na produção de

cliques ou de omissões pelo detector. Foi calculada a mediana do intervalo-entre-cliques de cada cadeia de cliques ao invés dos cliques individuais (para posteriormente serem utilizados no classificador de espécies de delfinídeos).

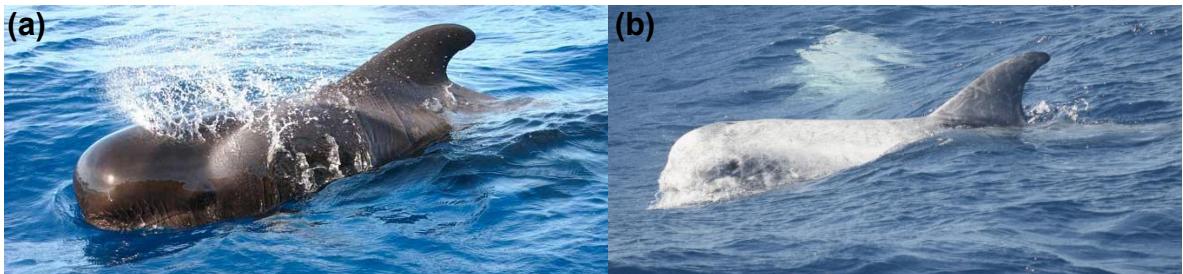
Foram observadas algumas situações em que os cliques sofreram saturação, condição que ocorre quando o sinal recebido ultrapassa o limite de amplitude suportado pelo sistema de gravação. Nestes casos estes sinais foram identificados e descartados, pois no processo de saturação o sinal sofre distorções e perde suas características originais. Foi feita uma inspeção automática de todos os arquivos de áudio processados para identificar pontos de saturação. Foi estabelecido um limiar de 90% da capacidade do sistema, sendo que cliques que ultrapassaram este limite foram descartados das análises. Por último, foi feita uma filtragem para manter apenas os cliques na qual a duração foi igual ou maior do que 2 e menor ou igual a 2.000 µs.

### 5.1.2 Classificador acústico de cliques de delfinídeos

A estratégia aplicada para o classificador de cliques de delfinídeos foi guiada por resultados experimentais e definida para equilibrar o desempenho e os riscos de sobreajuste. Foram treinados e validados diferentes modelos de classificadores de cliques, de acordo com o número de espécies presentes. Primeiramente, um modelo com as mesmas sete espécies do classificador de assobios (**Capítulo 1**): golfinho-comum (*D.delphis*), golfinho-pintado-pantropical (*S.attenuata*), golfinho-de-dentes-rugosos (*S.bredanensis*), golfinho-de-Clymene (*S.clymene*), golfinho-pintado-do-Atlântico (*S.frontalis*), golfinho-rotador (*S.longirostris*) e golfinho-nariz-de-garrafa (*T.truncatus*). Um segundo modelo incluiu outras duas espécies: a baleia-piloto (*Globicephala* sp.) e o golfinho-de-risso (*Grampus griseus*) (**Figura 5.2**). Diferente dos assobios, os dados de cliques destas duas espécies foram considerados suficientes para treinamento dos modelos.

Existem duas espécies de baleia-piloto: a de peitorais-curta (*G.macrorhynchus*), comum em regiões tropicais, e a de peitorais-longas (*G.melas*), presente em águas subtropicais a subantárticas (OLSON, 2009). A Bacia de Santos está numa área de simpatria entre as duas espécies. Neste estudo, a espécie será referida como *Globicephala* sp. Outras quatro espécies tiveram baixa representatividade de eventos acústicos e cliques detectados e não foram incluídas no classificador de cliques, entre elas: baleia-orca (*Orcinus orca*), falsa-orca

(*Pseudorca crassidens*), orca-pigméia (*Feresa attenuata*) e golfinho-cabeça-de-melão (*Peponocephala electra*).



**Figura 5.2** - Fotos ilustrando duas das espécies de delfinídeos incluídas no classificador de cliques (a) baleia-piloto (*Globicephala* sp.) e (b) golfinho-de-risso (*Grampus griseus*). Créditos: PMC-BS/Petrobras.

A quantidade de cliques obtidos variou bastante, podendo chegar a milhares de cliques para um único evento acústico. Foi definido um limite de 1.000 cliques por grupo para evitar o viés de muitas amostras de pouco eventos. Para os eventos com número superior ao limite definido foi feita uma amostragem aleatória. O custo computacional do classificador também foi um fator relevante dado o grande número de amostras. O treinamento e validação do classificador de cliques foi feito utilizando a estratégia de “deixar-um-grupo-de-fora” (LOGO). Nesta estratégia, um único evento acústico é retirado (deixado de fora) para teste e o restante dos dados utilizados para o treinamento. Os dados para treino passam pela etapa de balanceamento e o evento deixado de fora é testado a partir do modelo treinado. O evento testado volta então para os dados de treinamento e um novo evento é retirado para o teste. Este processo é repetido até que todos os eventos sejam testados.

Análises preliminares mostraram que o treinamento dos dados sem considerar os eventos acústicos como independentes mostrou indícios de sobreajuste. O desenvolvimento de um meta-classificador de cliques similar ao aplicado para os assobios na análise prévia (ver Capítulo 1) foi descartado, uma vez que as análises preliminares com os cliques mostraram resultados com desempenho inferior. Após a avaliação experimental, os hiperparâmetros do modelo foram fixados para priorizar simplicidade, eficiência e generalização. O número de árvores foi fixado em 500, a profundidade das árvores em 20 e o número de variáveis aleatórias a cada divisão correspondente a raiz quadrada do total de variáveis. Além da eficiência computacional, estes hiperparâmetros colaboraram para evitar o sobreajuste dos dados,

na tentativa de forçar o modelo a identificar padrões robustos e generalizados ao invés de memorizar nuances específicas alheias às características espécie-específicas dos cliques. O modelo de classificador de cliques foi executado cinco vezes, utilizando diferentes fatores de randomização para reproduzir diferentes situações de aleatorização que limitaram os grupos ao máximo de 1.000 amostras de cliques e partições ligeiramente diferentes dos dados durante o balanceamento e construção das árvores em cada execução. A validação cruzada foi realizada tanto no nível individual das amostras de cliques (LOGO ind) quanto no nível dos eventos acústicos (LOGO grupo). O resultado reportado corresponde à média das cinco execuções, o que ajuda a suavizar a aleatoriedade e reduz o impacto de decisões “outliers” de qualquer execução individual. Uma amostra balanceada de cada uma das cinco rodadas do classificador LOGO de cliques, foi utilizada para calcular a importância média global das variáveis através do método da permutação; e o algoritmo TreeSHAP para a importância das variáveis entre as diferentes espécies.

### 5.1.3 Classificador acústico combinado de assovios e cliques

O classificador combinado de assovios e cliques foi desenvolvido baseado no conceito de meta-classificador. Os resultados dos classificadores de cada tipo de vocalização (classificadores de base) foram usados como variáveis para o treinamento do modelo combinado. A unidade amostral que alimentou o classificador combinado correspondeu aos eventos acústicos. As variáveis foram as distribuições das probabilidades de classificação referente a cada espécie previamente obtidas pelos modelos de classificação de cada tipo de vocalização: assovios (Capítulo 1) e cliques (este capítulo). Esta estratégia busca encontrar padrões nos erros e acertos dos classificadores de base (quais espécies são confundidas com qual e em que proporção). Para ambos os sinais (assovios e cliques) a distribuição de probabilidades entre as espécies foi obtida a partir do classificador LOGO grupo (classificação ao nível de evento acústico).

Inicialmente, foi considerado o modelo de cliques com nove espécies combinado ao modelo de assovios (sete espécies). Três variações de modelos foram treinadas e testadas. No primeiro, todos eventos acústicos foram incluídos, independentemente da disponibilidade de dados de assovios e/ou cliques. Isso significava que os eventos acústicos poderiam conter tanto variáveis de assovios

quanto de cliques, ou apenas uma das duas. Essa abordagem permitiu a inclusão de espécies como o golfinho-de-risso (*G.griseus*) e a baleia-piloto (*Globicephala* sp.), para as quais somente as variáveis de cliques estavam disponíveis. Portanto, os eventos acústicos que continham dados de apenas um tipo de vocalização, as variáveis ficaram ausentes para o outro tipo. Nestes casos as árvores de decisão avaliam diferentes formas de lidar com valores ausentes, sempre maximizando o critério de divisão com base nos dados disponíveis. Quando um dado de teste contém valores ausentes, a árvore decide o caminho que ele deve seguir com base nas regras aprendidas durante o treinamento. Em caso de empate, o valor ausente é enviado por padrão para o nó da direita. Quando um valor ausente aparece no conjunto de teste para uma variável que não tinha valores ausentes no treinamento, ele é direcionado para o nó com o maior número de amostras. Para avaliar o impacto da ausência de algum tipo de vocalização nos modelos treinados, foram consideradas três variações dos modelos: 1) todos os eventos acústicos foram considerados 2) somente os eventos acústicos que continham ambos assobios e cliques e 3) eventos que continham ambos assobios e cliques ou somente assobios. Modelos com eventos que continham ambos assobios e cliques ou somente cliques não foram considerados, uma vez que análises preliminares mostraram desempenho inferior.

O modelo completo, baseado nas nove espécies, resultou em um total de 16 variáveis (sete do classificador de assobios e nove do classificador de cliques). Além disso, um modelo combinado alternativo foi treinado utilizando as probabilidades do modelo de cliques com apenas sete espécies, totalizando 14 variáveis (sete de assobios e sete de cliques). Os mesmos três tipos de estrutura de modelos descritos acima foram aplicados também para esse modelo reduzido, a fim de possibilitar a comparação com os resultados obtidos pelo modelo combinado com nove espécies. Variações adicionais dos modelos também foram testadas, substituindo as probabilidades da espécie *T.truncatus* do classificador LOGO grupo de assobios pelas probabilidades geradas pelo meta-classificador de assobios, que apresentou desempenho superior para essa espécie (**ver Capítulo 1**).

Por fim, foram testadas variações dos modelos combinados incluindo as coordenadas geográficas dos eventos acústicos como variáveis adicionais no treinamento. No total, quatro variações foram avaliadas: 1) modelo com as probabilidades do classificador de assobios original (“sem meta Tt”), 2) modelo com as probabilidades de *T.truncatus* provenientes do meta-classificador de assobios

(“com meta Tt”), 3) modelo “sem meta Tt” com inclusão das coordenadas geográficas (“sem meta Tt com lat long”) e 4) modelo “com meta Tt” também com coordenadas geográficas (“com meta Tt com lat long”).

Os testes dos modelos foram realizados seguindo a mesma lógica dos classificadores de cada tipo de vocalização separados (assovios ou cliques), aplicando-se o algoritmo de floresta aleatória e a estratégia de validação cruzada LOGO com sucessivos treinamentos do modelo até que todos os eventos acústicos sejam testados. Isso garante que o teste fosse feito com dados não vistos pelo modelo treinado. Como a unidade amostral são os eventos acústicos e os dados de treinamento foram balanceados, os modelos resultantes tiveram um baixo número de amostras (eventos), uma vez que certas espécies tiveram baixa representatividade de eventos nos dados. A eficiência computacional não foi um fator relevante para o treinamento e teste dos modelos combinados. Os hiperparâmetros foram fixados em 1.000 árvores e não foi estabelecido um limite para a profundidade máxima das árvores. Ou seja, as árvores puderam crescer até que cada folha continha amostras apenas de uma única espécie ou todas as amostras em um nó tinham os mesmos valores. Como forma de mitigar o sobreajuste aos dados pelos modelos que isso possa causar, o número de variáveis a cada divisão correspondeu a raiz quadrada do total de variáveis, que é uma escolha padrão que funciona bem na maioria das aplicações de floresta aleatória. Por fim, ao invés das cinco execuções do modelo conforme feitas para os classificadores de assovios e de cliques, foram aplicadas 10 execuções utilizando diferentes fatores de randomização para balanceamento dos dados de treino e geração das árvores. No cenário de poucas amostras para treinamento após o balanceamento, o resultado médio de um maior número de execuções contribui para que o impacto da aleatoriedade seja minimizado, fornecendo uma avaliação mais consistente do desempenho geral do modelo.

#### 5.1.4 Classificação ponderada de múltiplos modelos

Considerando os diferentes classificadores desenvolvidos, os resultados das probabilidades agregadas podem ser usados para a predição de novos dados. Os testes devem ser feitos em todos os modelos previamente treinados (classificador de assovios, meta-classificador de assovios, classificador de cliques e classificadores combinando assovios e cliques) para que se obtenha os resultados da distribuição de

probabilidades de cada um. Pesos com diferentes valores podem ser então atribuídos aos modelos de acordo com o desempenho individual das espécies. Esta abordagem possibilita um ajuste fino e é útil quando os diferentes modelos têm um desempenho variável. A predição final por agregação ponderada de probabilidades dos modelos é feita somando-se as probabilidades de cada espécie calculadas com os respectivos pesos. A soma deste valor é então normalizada, dividindo o valor pela soma dos pesos e a espécie com maior probabilidade normalizada é aceita como a predição final.

## 5.2 RESULTADOS

### 5.2.1 Classificador acústico de cliques de delfinídeos

A **Tabela 5.1** resume os dados de cliques das nove espécies analisadas, com o número de eventos acústicos e de cliques por espécie. O limite máximo de cliques por evento acústico foi limitado a 1.000 para evitar que grupos com maior número de cliques dominassem os dados.

**Tabela 5.1** - Sumário do volume de dados acústicos de cliques de ecolocalização de nove espécies de delfinídeos. Dados coletados durante 18 campanhas de amostragem visual e acústica do PMC-BS na Bacia de Santos e duas campanhas do PMC-Peregrino na Bacia de Campos. Os eventos acústicos são os registros independentes de grupos de golfinhos associados a um conjunto de cliques detectados. O número de cadeias de cliques corresponde ao total obtido pelo detector automático do PAMGuard (“Click Train Detector”). O número de cliques detectados corresponde ao total de amostras individuais obtidas pelo detector e os cliques processados o total utilizado no treinamento e validação de classificadores acústicos (limitado a 1.000 cliques por evento acústico).

Espécie	Número de eventos acústicos	Número de cadeia de cliques	Número de cliques detectados	Número de cliques processados
<i>Delphinus delphis</i>	8	364	4.115	3.420
<i>Grampus griseus</i>	10	634	8.976	5.213
<i>Globicephala</i> sp.	14	166	2.199	2.199
<i>Stenella attenuata</i>	18	769	8.733	7.014
<i>Steno bredanensis</i>	6	706	7.895	4.491
<i>Stenella clymene</i>	11	611	7.219	4.630
<i>Stenella frontalis</i>	62	4.790	57.459	29.400
<i>Stenella longirostris</i>	21	1.913	23.061	13.614
<i>Tursiops truncatus</i>	29	2293	32.016	13.334
<b>Total</b>	<b>179</b>	<b>12.246</b>	<b>151.673</b>	<b>83.315</b>

No total foram 179 eventos acústicos e 83.315 cliques, incluindo nove espécies. Cerca de um terço dos grupos foram do golfinho-pintado-do-Atlântico (*S.frontalis*) (62 eventos acústicos ou 34% do total de eventos) e a espécie com menor representatividade foi o golfinho-de-dentes-rugosos (*S.bredanensis*) (6 eventos ou 3%), seguido do golfinho-comum *D.delphis* (8 eventos ou 4%). Para as outras espécies o total de eventos ficou entre cerca de 10 a 30. No **Apêndice D** encontra-se

a tabela com as principais variáveis acústicas extraídas para os cliques destas nove espécies.

No modelo de sete espécies *D.delphis* foi a espécie com menor número de amostras (3.420 cliques), o que produziu dados de treinamento com 23.940 amostras igualmente distribuídas entre as espécies após o balanceamento. Já no modelo de nove espécies foi *Globicephala* sp. (2.199 cliques) e foi utilizado um total de 19.791 amostras igualmente distribuídas entre as espécies. Como foi utilizada somente a estratégia de validação cruzada de “deixar-um-grupo-de-fora” (LOGO), os eventos foram mantidos como unidades independentes durante o treinamento e teste, que produziu resultados no nível individual dos cliques (LOGO ind) e no nível de evento (LOGO grupo). Todos os eventos se alternaram entre os dados de treinamento e teste. Portanto, nos dados de teste, que inclui todos os dados, o desbalanceamento entre as espécies se manteve.

Os resultados revelaram um baixo poder discriminativo dos cliques, salvo algumas espécies. Para o modelo de sete espécies, a acurácia média global das cinco execuções do classificador LOGO ind foi de 22% ( $\pm 0,3$ ) e acurácia balanceada 23% ( $\pm 0,5$ ). O desempenho foi melhor para a classificação dos eventos acústicos (LOGO grupo), com acurácia global de 41% ( $\pm 2,0$ ) e acurácia balanceada de 46% ( $\pm 2,0$ ). No modelo incluindo as duas outras espécies (nove espécies), a acurácia média global das cinco execuções do classificador LOGO ind foi de 19% ( $\pm 0,2$ ) e acurácia balanceada 23% ( $\pm 0,2$ ). Já para a classificação dos eventos (LOGO grupo) com as nove espécies, a média da acurácia global foi de 41% ( $\pm 1,4$ ) e acurácia balanceada de 49% ( $\pm 1,6$ ) (**Tabela 5.2**).

Na classificação dos cliques individuais os resultados mostraram um desempenho ruim. Em quase todas as espécies a métrica de sensibilidade ficou abaixo de 30%, revelando a dificuldade em discriminar as espécies pelos cliques quando tratados de forma individual. Para o golfinho-de-risso (*G.griseus*), presente apenas no modelo de nove espécies, o percentual foi um pouco maior (43%). No geral, houve uma leve piora da sensibilidade das espécies ao comparar o modelo de sete espécies em relação ao modelo de nove. Três espécies do gênero *Stenella* (*S.clymene*, *S.longirostris* e *S.frontalis*) tiveram valores de sensibilidade abaixo de 20% para cliques individuais, revelando uma grande dificuldade em discriminar estas espécies através dos cliques individuais.

Para a classificação dos grupos, as espécies com desempenho ruim nos cliques individuais continuaram com pontuação baixa, principalmente *S.clymene* (média de  $25\% \pm 10\%$  no modelo de sete espécies e  $24\% \pm 4\%$  no de nove espécies). Outras espécies com desempenho ruim foram *S.longirostris* ( $33\% \pm 9\%$  para sete espécies e  $28\% \pm 4\%$  para sete espécies) e *S.frontalis* ( $39\% \pm 1\%$  para sete espécies e  $32\% \pm 4\%$  para nove espécies). *T.truncatus* também apresentou um baixo desempenho. Na classificação de eventos o valor de sensibilidade foi de  $35\% \pm 4\%$  para sete espécies e  $33\% \pm 6\%$  para o modelo de nove espécies. As espécies com resultados melhores foram *S.attenuata* ( $57\% \pm 6\%$  e  $54\% \pm 6\%$ , para os modelos de sete e nove espécies respectivamente), *S.bredanensis* ( $63\% \pm 7\%$  e  $53\% \pm 7\%$ ), *D.delphis* ( $70\% \pm 7\%$  e  $63\% \pm 0\%$ ) e as duas espécies exclusivas do modelo de nove espécies, *Globicephala* sp. ( $56\% \pm 3\%$ ) e *G.griseus* ( $92\% \pm 4\%$ ), esta última foi o destaque, com desempenho maior do que todas as outras espécies (**Tabela 5.2**).

O desempenho global baixo, até mesmo na classificação de eventos (acurácia balanceada de pouco menos de 50%) foi influenciado principalmente pelas quatro espécies que tiveram pontuação baixa (*S.clymene*, *S.longirostris*, *S.frontalis* e *T.truncatus*). Os resultados similares da acurácia global balanceada entre os modelos de sete e nove espécies foi impulsionado pelo desempenho mediano de uma das espécies incluídas (*Globicephala* sp.) e muito bom para a outra (*G.griseus*). Isso fez com que no modelo de nove espécies a acurácia balanceada fosse até maior em relação ao de sete espécies (ainda que o desempenho das outras espécies terem sido abaixo).

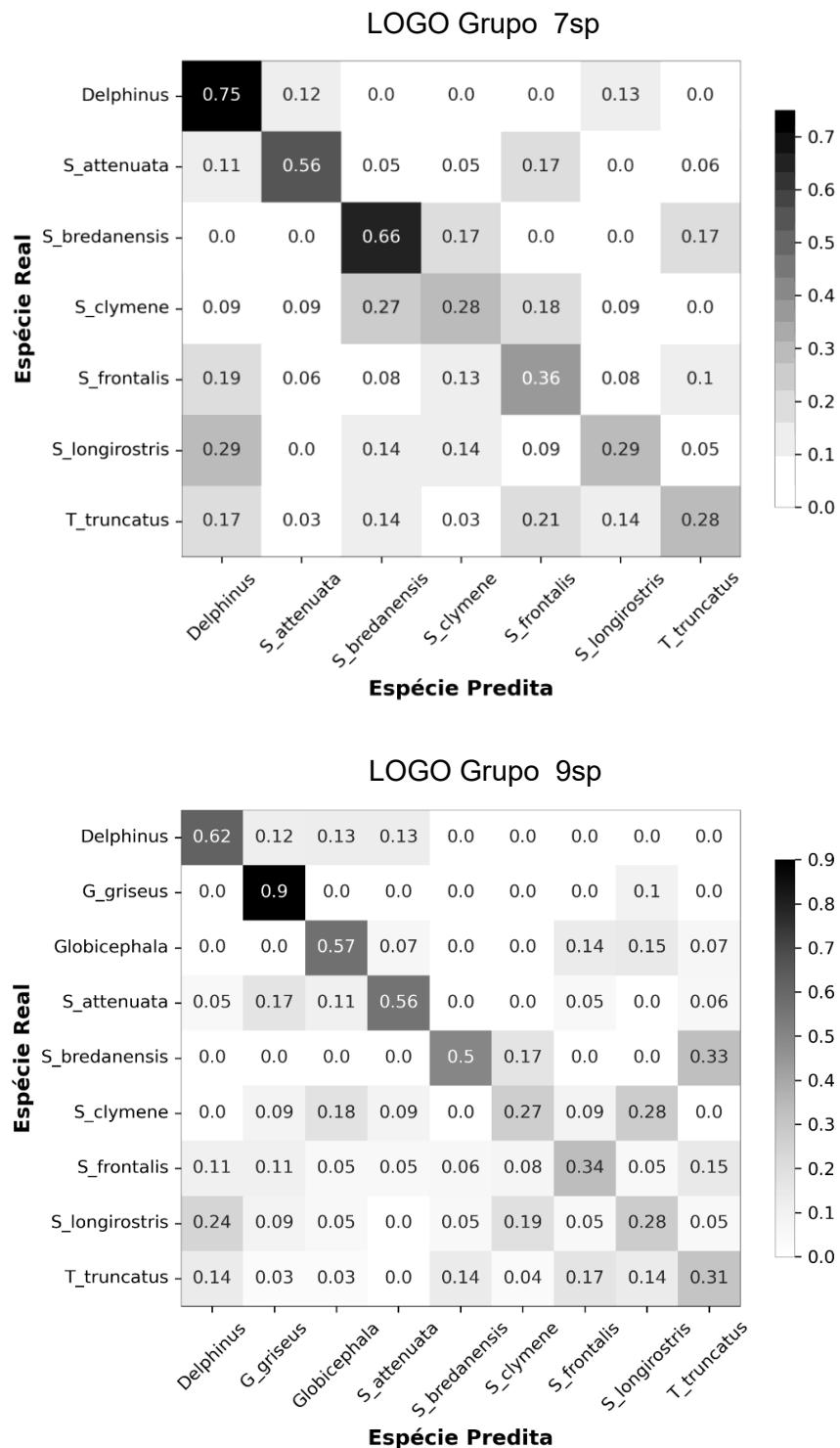
Ainda considerando a classificação de eventos, a precisão também foi baixa para a maioria das espécies. Assim como para a sensibilidade, *S.clymene* foi a espécie com valores mais baixos para esta métrica (16% e 20% para os modelos de sete e nove espécies, respectivamente). Outras espécies que apresentaram precisão baixa (cerca de 30% ou abaixo) foram *S.longirostris*, *D.delphis* e *S.bredanensis*. Já as outras espécies tiveram valores medianos, que variaram entre 41% a 61%, sendo que *S.frontalis* atingiu 68% ou 71% (modelos de sete e nove espécies, respectivamente). No entanto o número de eventos testados para esta espécie ( $n = 62$ ) foi muito superior às outras, o que pode inflar os valores de precisão observados. O valor do F1-score apresentou valores de ruim a medianos, conforme o balanço dos valores de precisão e sensibilidade. A espécie com maior valor de F1-score foi *S.attenuata* com 57% e

58% (modelos de sete e nove espécies, respectivamente). A média ponderada do F1-score para classificação dos eventos foi de 42% entre as cinco execuções, tanto para o modelo de sete espécies como de nove espécies (**Tabela 5.2**).

Nas matrizes de confusão (**Figura 5.3**) os resultados de uma das cinco execuções, tanto para o modelo de sete como de nove espécies (LOGO grupo 7sp e LOGO grupo 9sp). Conforme observado, a espécie com cliques mais distintos e menos confundida com outras espécies foi *G.griseus* (modelo de nove espécies). Espécies como *D.delphis*, *S.attenuata*, *Globicephala* sp. e *S.bredanensis* tiveram resultados de bom a mediano, ainda que houveram eventos confundidos com outras espécies. *D.delphis* por exemplo foi confundido principalmente com *S.attenuata* e *S.longirostris*, mas também com *G.griseus* e *Globicephala* sp. no modelo de 9 espécies. *S.bredanensis* foi confundido com *S.clymene* e *T.truncatus*. Já *S.attenuata* houve confusão com um maior número de espécies. Foi bastante notável o grau de confusão entre as três espécies do gênero Stenella (*S.clymene*, *S.frontalis* e *S.longirostris*) e *T.truncatus*. Essas quatro espécies tiveram um desempenho ruim, sendo confundidas entre si, com exceção de *S.clymene*, que não foi confundida com *T.truncatus*, mas com *S.bredanensis* (e também com *Globicephala* sp. no caso do modelo de nove espécies). *S.longirostris* e *T.truncatus* também foram bastante confundidas com *D.delphis*. No geral, os cliques de delfinídeos da maior parte das espécies se mostraram similares entre si, o que refletiu nas métricas consideradas de ruins a medianas, com poucas espécies com valores que podem ser considerados satisfatórios.

**Tabela 5.2** - Resultados da precisão, sensibilidade, F1-score, acurácia global e acurácia global balanceada do classificador de cliques de ecolocalização para os modelos com sete espécies (7sp) e nove espécies (9sp) de delfinídeos da Bacia de Santos utilizando modelos de floresta aleatória. Os resultados são do classificador LOGO (validação cruzada por exclusão de um evento) com dois resultados: LOGO ind para os cliques individuais e LOGO grupo para a classificação de eventos inteiros (eventos acústicos). Os resultados foram obtidos a partir da média de cinco execuções com variações na randomização dos dados平衡ados e das árvores de decisão.

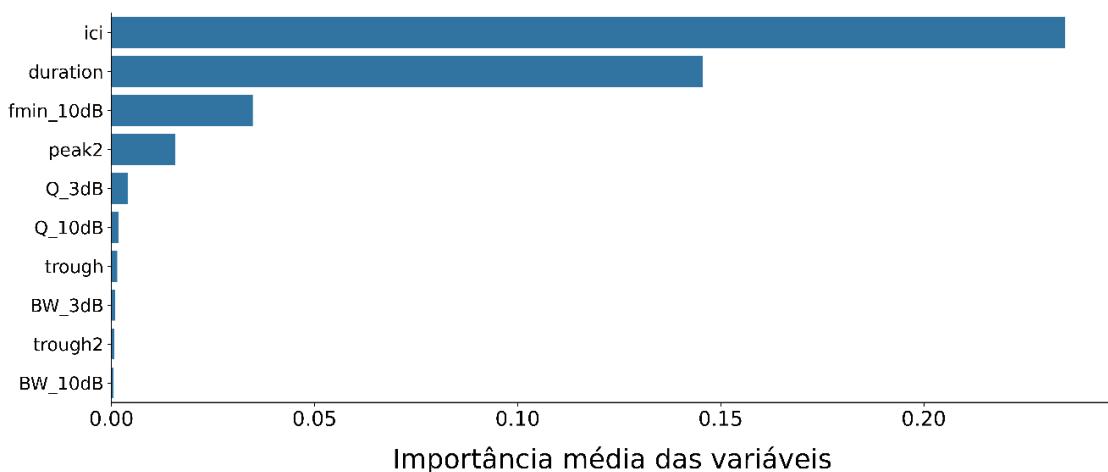
Espécie	Métrica	LOGO 7sp ind	LOGO 9sp ind	LOGO 7sp Grupo	LOGO 9sp Grupo
<i>Delphinus delphis</i>	Precisão	0,08	0,08	0,22	0,22
	Sensibilidade	0,27	0,24	0,70	0,63
	F1-score	0,12	0,12	0,34	0,32
<i>Grampus griseus</i>	Precisão	-	0,21	-	0,41
	Sensibilidade	-	0,43	-	0,92
	F1-score	-	0,28	-	0,56
<i>Globicephala</i> sp.	Precisão	-	0,10	-	0,47
	Sensibilidade	-	0,25	-	0,56
	F1-score	-	0,14	-	0,51
<i>Stenella attenuata</i>	Precisão	0,18	0,16	0,59	0,61
	Sensibilidade	0,27	0,23	0,57	0,54
	F1-score	0,22	0,19	0,58	0,57
<i>Steno bredanensis</i>	Precisão	0,13	0,12	0,21	0,23
	Sensibilidade	0,26	0,23	0,63	0,53
	F1-score	0,17	0,16	0,31	0,32
<i>Stenella clymene</i>	Precisão	0,09	0,09	0,16	0,20
	Sensibilidade	0,17	0,14	0,24	0,25
	F1-score	0,12	0,11	0,19	0,22
<i>Stenella frontalis</i>	Precisão	0,47	0,42	0,68	0,71
	Sensibilidade	0,19	0,14	0,39	0,32
	F1-score	0,27	0,21	0,49	0,44
<i>Stenella longirostris</i>	Precisão	0,23	0,22	0,31	0,29
	Sensibilidade	0,19	0,15	0,33	0,28
	F1-score	0,21	0,18	0,32	0,28
<i>Tursiops truncatus</i>	Precisão	0,26	0,26	0,49	0,46
	Sensibilidade	0,26	0,24	0,33	0,35
	F1-score	0,26	0,25	0,39	0,40
Acurácia geral		0,22	0,19	0,41	0,41
<b>Acurácia geral balanceada</b>		<b>0,23</b>	<b>0,23</b>	<b>0,46</b>	<b>0,49</b>
<b>Média ponderada de F1-score</b>		<b>0,22</b>	<b>0,20</b>	<b>0,42</b>	<b>0,42</b>



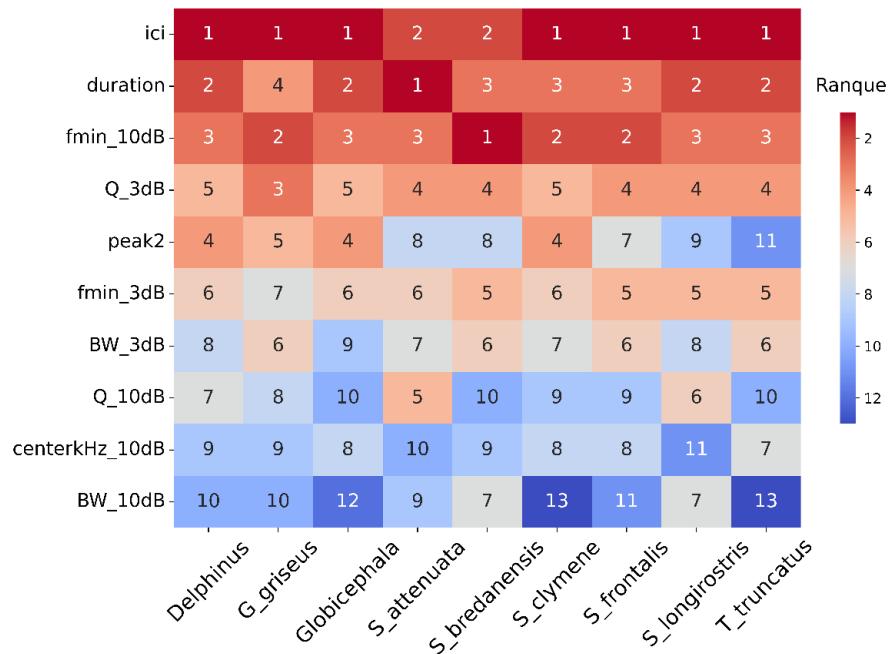
**Figura 5.3** - Matrizes de confusão dos modelos de floresta aleatória utilizando cliques de ecolocalização para classificação de eventos acústicos de delfinídeos na Bacia de Santos. Acima o modelo de classificador com sete espécies e abaixo o modelo com nove espécies. Na diagonal da matriz estão os valores das taxas de acerto (acurácia) para cada uma das espécies. A classificação dos eventos foi feita a partir da estratégia de “deixar-um-grupo-de-fora” (LOGO grupo). Os testes são feitos separando um evento dos demais e o restante é utilizado para o treinamento a partir de uma amostra balanceada. O processo é repetido até que todos os eventos sejam testados.

### 5.2.1.1 Importância das variáveis

No ranque de importância global das variáveis (10 primeiras) calculadas pelo método de permutação (**Figura 5.4**) foram observadas quatro variáveis com valores médios de importância mais significativos dentre as 20 utilizadas. Foram elas: o intervalo-entre-cliques (ici), duração (duration), frequência mínima da largura da banda em -10 dB (fmin\_10dB) e a frequência pico secundária (peak2). As outras variáveis tiveram valores mais baixos na escala de importância. As variáveis temporais tiveram maior destaque, enquanto que os valores de frequência melhor ranqueados foram relacionados a largura da banda, mas também ao padrão de pico de frequência no espectro. Os maiores ici foram para *Globicephala* sp. (mediana de 164 ms) e os menores para *T.truncatus* e *S.frontalis* (63 e 66 ms, respectivamente). Entre as características do espectro, o limite da banda de -10 dB e o pico de frequência secundário foram as mais importantes. A mediana da frequência inferior da banda de -10 dB variou entre 24 kHz para *S.bredanensis* até 35 kHz para *G.griseus*. A importância de variáveis entre as espécies (**Figura 5.5**), mostrou que na maior parte das espécies o ici foi a primeira variável mais importante no ranque (segunda para *S.attenuata* e *S.bredanensis*), seguido da duração e largura da banda em -10 dB. A duração foi a mais importante para *S.attenuata* e a largura da banda para *S.bredanensis*. O valor Q\_3dB foi bem ranqueado e corresponde a razão entre a largura da banda em -3 dB e a frequência central. Outras variáveis de frequência foram importantes em diferentes graus entre as espécies.



**Figura 5.4** - Importância global das variáveis para o classificador de cliques de delfinídeos da Bacia de Santos pelo método de permutação (siglas e descrição das variáveis no Apêndice C).



**Figura 5.5** - Importância das variáveis por espécie para o classificador de cliques de delfinídeos da Bacia de Santos, calculado a partir de valores SHAP (algoritmo TreeSHAP). Escala de cores e valores na matriz indicam a posição das variáveis no ranqueamento entre as espécies (siglas e descrição das variáveis no Apêndice C).

### 5.2.2 Classificador acústico combinado de assovios e cliques

Três variações de modelos foram treinadas e testadas. No primeiro, todos eventos acústicos ( $n = 257$ ) foram incluídos, no segundo somente os eventos que obrigatoriamente continham tanto os assovios como cliques ( $n = 125$ ) e por último eventos que continham ambos assovios e cliques ou somente assovios ( $n = 203$ ) (Tabela 5.3). O treinamento foi realizado com dados balanceados, e os testes foram conduzidos com a estratégia “deixar-um-grupo-de-fora” (LOGO), mantendo, portanto, o desbalanceamento nos dados de teste. O conjunto de treino contou com um baixo número de amostras (eventos acústicos) após o balanceamento: no modelo considerando todos os eventos foram 49 eventos para o modelo de sete espécies (excluindo *G.griseus* e *Globicephala* sp., as quais os dados foram somente de cliques) e 63 eventos para o classificador de nove espécies. Já para o modelo que considerou exclusivamente os eventos contendo ambos os tipos de sinais (assovios e cliques), o conjunto de treino balanceado foi de 35 eventos. Por último o modelo que incluiu tanto os eventos com ambos ou somente assovios foram 42 eventos utilizados no treino.

**Tabela 5.3** - Total de eventos acústicos usados nos três modelos combinando assovios e cliques de delfinídeos da Bacia de Santos. AS/EC: eventos com assovios e cliques; AS/EC ou AS: eventos com ambos ou apenas assovios; Todos os eventos: todos os eventos disponíveis, independentemente do tipo de sinal. Espécies: Dd: *Delphinus delphis*, Gg: *Grampus griseus*, Gsp: *Globicephala* sp, Sa: *Stenella attenuata*, Sb: *Steno bredanensis*, Sc: *Stenella clymene*, Sf: *Stenella frontalis*, Sl: *Stenella longirostris*, Tt: *Tursiops truncatus*. Apenas as variáveis de cliques foram obtidas para as espécies *G. griseus* e *Globicephala* sp.

Modelo	Dd	Gg	Gsp	Sa	Sb	Sc	Sf	Sl	Tt	Total
Todos eventos	9	10	14	21	7	14	115	24	43	<b>257</b>
AS/EC	7	-	-	16	5	11	42	21	23	<b>125</b>
AS/EC ou AS	8	-	-	19	6	14	95	24	37	<b>203</b>

Os resultados das três variações do modelo combinado incluindo sete espécies (**Tabela 5.4**) e nove espécies (**Tabela 5.5**) foram em quatro versões: considerando a substituição ou não das probabilidades do meta-classificador de assovios (LOGO meta) de *T. truncatus* ao invés da probabilidade do classificador de assovios (LOGO grupo de assovios - conforme resultados do Capítulo 1) e incluindo ou não as coordenadas geográficas de cada evento acústico como variáveis adicionais. Os valores sumarizados (**Tabelas 5.4 e 5.5**) correspondem a média e o desvio padrão da sensibilidade por espécie, calculado a partir das 10 execuções em cada versão do modelo. Entre os três tipos de modelos, o que apresentou o melhor desempenho global foi aquele treinado e testado exclusivamente com eventos que continham obrigatoriamente tanto assovios quanto cliques, ou seja, com todas as variáveis disponíveis. Entre o modelo de sete e nove espécies a acurácia balanceada foi similar (76% para sete espécies e 75% nove espécies). O desvio padrão indicou variabilidade nos resultados entre as 10 rodadas, notavelmente para espécies como *S. attenuata*, *S. frontalis*, *S. longirostris*, *T. truncatus* e *Globicephala* sp. As duas espécies adicionais incluídas no modelo combinado com nove espécies, *Grampus griseus* e *Globicephala* sp., apresentaram o maior desempenho entre todas as espécies avaliadas, atingindo pontuação de 97% e 91%, respectivamente. A utilização das probabilidades de *T. truncatus* provenientes do meta-classificador de assovios não teve impacto no desempenho dessas espécies. Já a inclusão das coordenadas geográficas resultou em uma leve melhora no desempenho para *Globicephala* sp. De modo geral, o modelo de nove espécies com todos os eventos foi eficaz na classificação de *G. griseus* e

*Globicephala* sp., mesmo que os eventos dessas espécies dispusessem apenas de variáveis de cliques.

Por outro lado, os melhores resultados para as demais sete espécies foram obtidos nos modelos que incluíram exclusivamente eventos contendo tanto assovios quanto cliques (eventos com todas as variáveis disponíveis). O modelo de nove espécies com todos os eventos apresentou acurácia balanceada semelhante à do modelo composto apenas por eventos com ambos os tipos de sinais (assovios e cliques), com valores de 74% e 76%, respectivamente. Esse desempenho se deve, principalmente, aos bons resultados obtidos para *G.griseus* e *Globicephala* sp., que elevaram a pontuação geral do modelo. A inclusão da variável de *T.truncatus* proveniente do meta-classificador de assovios também resultou em melhorias, especialmente no desempenho da própria espécie. De modo geral, a inclusão das variáveis de coordenadas geográficas nos modelos resultou em desempenho ligeiramente superior ou similar ao dos modelos sem essas variáveis. Na comparação entre os classificadores de sete e nove espécies, considerando modelos do mesmo tipo, embora a acurácia global balanceada tenha sido semelhante, o modelo com sete espécies apresentou melhores resultados no desempenho individual destas espécies.

Em resumo, entre todos os modelos testados, o classificador combinado de assovios e cliques para sete espécies, considerando apenas eventos com ambas as variáveis disponíveis (variáveis completas), apresentou o melhor desempenho para as espécies incluídas: *D.delphis*, *S.attenuata*, *S.bredanensis*, *S.clymene*, *S.frontalis*, *S.longirostris* e *T.truncatus*. No modelo de nove espécies, foram incluídos todos os eventos, com a adição de *G.griseus* e *Globicephala* sp., cujos eventos continham apenas variáveis de cliques. Essas duas espécies apresentaram os melhores desempenhos, com as maiores pontuações entre todas as espécies avaliadas, enquanto as demais sete espécies tiveram desempenho inferior ou semelhante ao observado no modelo de sete espécies.

**Tabela 5.4** - Resultados do classificador combinado de assovios e cliques para sete espécies de delfinídeos na Bacia de Santos. A tabela apresenta a média da sensibilidade por espécie, com os respectivos desvios padrão entre parênteses, obtidos a partir de 10 execuções do modelo. Três conjuntos de dados foram testados, definidos pela presença de variáveis acústicas: (1) eventos contendo obrigatoriamente assovios e cliques; (2) eventos com ambos ou apenas assovios; e (3) todos os eventos disponíveis. Cada conjunto possui quatro versões, conforme a inclusão da variável meta Tt (meta-classificador de assovios para *Tursiops truncatus*) e das coordenadas geográficas (lat/long) como preditores. Os maiores valores de sensibilidade estão destacados em negrito.

Espécie	7sp Eventos com ambos assovios e cliques				7sp Eventos com ambos assovios e cliques ou assovios				7sp Todos eventos			
	Sem meta Tt	Com meta	Sem meta Tt lat long	Com meta Tt lat long	Sem meta Tt	Com meta	Sem meta Tt lat long	Com meta Tt lat long	Sem meta Tt	Com meta	Sem meta Tt lat long	Com meta Tt lat long
<i>Delphinus delphis</i>	0,81 (±0,07)	0,83 (±0,06)	0,84 (±0,05)	<b>0,86</b> (±0,00)	0,75 (±0,08)	0,75 (±0,06)	0,79 (±0,06)	0,78 (±0,08)	0,78 (±0,08)	0,77 (±0,06)	0,81 (±0,11)	0,82 (±0,12)
<i>Stenella attenuata</i>	0,74 (±0,11)	0,76 (±0,10)	0,75 (±0,10)	0,76 (±0,08)	0,76 (±0,14)	0,77 (±0,13)	0,79 (±0,09)	<b>0,80</b> (±0,11)	0,69 (±0,07)	0,70 (±0,07)	0,76 (±0,08)	0,78 (±0,07)
<i>Steno bredanensis</i>	<b>0,80</b> (±0,00)	<b>0,80</b> (±0,00)	<b>0,80</b> (±0,00)	<b>0,80</b> (±0,00)	0,78 (±0,08)	0,78 (±0,08)	0,78 (±0,08)	0,78 (±0,08)	0,70 (±0,07)	0,70 (±0,04)	0,70 (±0,05)	0,71 (±0,00)
<i>Stenella clymene</i>	0,91 (±0,07)	0,91 (±0,07)	<b>0,95</b> (±0,08)	0,93 (±0,07)	0,81 (±0,08)	0,82 (±0,07)	0,84 (±0,07)	0,85 (±0,05)	0,85 (±0,04)	0,84 (±0,06)	0,88 (±0,05)	0,87 (±0,05)
<i>Stenella frontalis</i>	0,68 (±0,06)	0,71 (±0,07)	0,72 (±0,07)	0,74 (±0,08)	0,74 (±0,08)	0,75 (±0,07)	<b>0,78</b> (±0,08)	<b>0,78</b> (±0,09)	0,60 (±0,04)	0,60 (±0,10)	0,63 (±0,11)	0,63 (±0,11)
<i>Stenella longirostris</i>	0,79 (±0,09)	0,82 (±0,08)	0,80 (±0,08)	<b>0,83</b> (±0,08)	0,77 (±0,06)	0,75 (±0,06)	0,79 (±0,07)	0,78 (±0,07)	0,79 (±0,09)	0,78 (±0,06)	0,80 (±0,04)	0,80 (±0,05)
<i>Tursiops truncatus</i>	0,37 (±0,06)	0,42 (±0,06)	0,37 (±0,06)	<b>0,44</b> (±0,05)	0,31 (±0,08)	0,34 (±0,08)	0,31 (±0,09)	0,36 (±0,08)	0,25 (±0,06)	0,27 (±0,10)	0,27 (±0,12)	0,30 (±0,11)
<b>Acurácia balanceada</b>	0,73 (±0,02)	0,75 (±0,03)	0,75 (±0,02)	<b>0,76</b> (±0,02)	0,70 (±0,03)	0,71 (±0,02)	0,73 (±0,03)	0,73 (±0,02)	0,67 (±0,03)	0,67 (±0,03)	0,69 (±0,03)	0,70 (±0,04)
<b>Média ponderada do F1</b>	0,68 (±0,03)	0,71 (±0,04)	0,70 (±0,03)	<b>0,73</b> (±0,04)	0,68 (±0,02)	0,69 (±0,02)	0,70 (±0,02)	0,71 (±0,02)	0,60 (±0,03)	0,60 (±0,06)	0,63 (±0,06)	0,64 (±0,07)

**Tabela 5.5** - Resultados do classificador combinado de assovios e cliques para sete espécies de delfinídeos na Bacia de Santos. A tabela apresenta a média da sensibilidade por espécie, com os respectivos desvios padrão entre parênteses, obtidos a partir de 10 execuções do modelo. Três conjuntos de dados foram testados, definidos pela presença de variáveis acústicas: (1) eventos contendo obrigatoriamente assovios e cliques; (2) eventos com ambos ou apenas assovios; e (3) todos os eventos disponíveis. Cada conjunto possui quatro variações, conforme a inclusão da variável meta Tt (meta-classificador de assovios para *Tursiops truncatus*) e das coordenadas geográficas (lat/long) como preditores. Os maiores valores de sensibilidade estão destacados em negrito.

Espécie	9sp Eventos com ambos assovios e cliques				9sp Eventos com ambos assovios e cliques ou assovios				9sp Todos Eventos			
	Sem meta Tt	Com meta	Sem meta Tt lat long	Com meta Tt lat long	Sem meta Tt	Com meta	Sem meta Tt lat long	Com meta Tt lat long	Sem meta Tt	Com meta	Sem meta Tt lat long	Com meta Tt lat long
<i>Delphinus delphis</i>	0,79 (±0,10)	0,79 (±0,10)	0,79 (±0,10)	<b>0,81</b> (±0,10)	0,74 (±0,07)	0,74 (±0,07)	0,75 (±0,06)	0,75 (±0,08)	0,76 (±0,04)	0,73 (±0,06)	0,74 (±0,05)	0,73 (±0,06)
<i>Grampus griseus</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	<b>0,97</b> (±0,05)	<b>0,97</b> (±0,05)	<b>0,97</b> (±0,05)	<b>0,97</b> (±0,05)
<i>Globicephala sp.</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	0,84 (±0,12)	0,83 (±0,12)	0,89 (±0,10)	<b>0,91</b> (±0,12)
<i>Stenella attenuata</i>	0,74 (±0,14)	0,75 (±0,13)	0,73 (±0,14)	<b>0,77</b> (±0,12)	0,75 (±0,19)	0,75 (±0,17)	0,74 (±0,17)	0,76 (±0,14)	0,67 (±0,10)	0,67 (±0,11)	0,71 (±0,12)	0,72 (±0,09)
<i>Steno bredanensis</i>	<b>0,80</b> (±0,00)	<b>0,80</b> (±0,00)	<b>0,80</b> (±0,00)	<b>0,80</b> (±0,00)	<b>0,80</b> (±0,07)	0,78 (±0,08)	0,78 (±0,08)	0,78 (±0,08)	0,70 (±0,05)	0,70 (±0,05)	0,70 (±0,05)	0,70 (±0,05)
<i>Stenella clymene</i>	<b>0,92</b> (±0,07)	0,91 (±0,06)	<b>0,92</b> (±0,07)	0,91 (±0,06)	0,84 (±0,07)	0,83 (±0,07)	0,84 (±0,06)	0,85 (±0,05)	0,87 (±0,05)	0,86 (±0,04)	0,87 (±0,05)	0,87 (±0,05)
<i>Stenella frontalis</i>	0,71 (±0,08)	0,72 (±0,08)	0,74 (±0,06)	0,75 (±0,08)	0,75 (±0,08)	0,74 (±0,09)	<b>0,77</b> (±0,09)	0,76 (±0,09)	0,59 (±0,10)	0,60 (±0,10)	0,60 (±0,09)	0,60 (±0,10)
<i>Stenella longirostris</i>	0,81 (±0,12)	<b>0,83</b> (±0,10)	0,80 (±0,09)	0,80 (±0,09)	0,77 (±0,07)	0,77 (±0,05)	0,81 (±0,05)	0,80 (±0,07)	0,80 (±0,06)	0,79 (±0,04)	0,80 (±0,06)	0,82 (±0,04)
<i>Tursiops truncatus</i>	0,36 (±0,07)	<b>0,41</b> (±0,07)	0,34 (±0,07)	<b>0,41</b> (±0,04)	0,32 (±0,09)	0,34 (±0,10)	0,33 (±0,07)	0,36 (±0,07)	0,25 (±0,11)	0,25 (±0,10)	0,25 (±0,10)	0,28 (±0,10)
<b>Acurácia balanceada</b>	0,73 (±0,04)	0,74 (±0,04)	0,73 (±0,03)	<b>0,75</b> (±0,03)	0,71 (±0,03)	0,71 (±0,03)	0,72 (±0,02)	0,72 (±0,02)	0,71 (±0,04)	0,71 (±0,03)	0,73 (±0,03)	0,74 (±0,02)
<b>Média ponderada do F1</b>	0,69 (±0,04)	0,71 (±0,04)	0,69 (±0,03)	<b>0,72</b> (±0,03)	0,68 (±0,03)	0,69 (±0,04)	0,69 (±0,03)	0,70 (±0,03)	0,62 (±0,07)	0,61 (±0,05)	0,62 (±0,05)	0,63 (±0,04)

### 5.2.3 Classificação ponderada de múltiplos modelos

Por fim, é proposto um sistema para predição de novos dados, que combina múltiplos modelos por meio da ponderação das probabilidades geradas (modelos para assovios, cliques e ambos). Os eventos acústicos são formados por conjuntos de vocalizações, que podem incluir assovios, cliques ou ambos, associados a um agrupamento de animais registrados durante as gravações de campo. O resultado de cada classificador corresponde à distribuição de probabilidades entre as espécies, sempre com base na classificação no nível do evento acústico. A proposta inclui a aplicação de seis classificadores distintos para a agregação das probabilidades por espécie e tomada da decisão final de classificação: o classificador de assovios e seu meta-classificador, dois classificadores de cliques (um com sete e outro com nove espécies), e dois classificadores combinados de assovios e cliques; um considerando sete espécies com todas as variáveis presentes (eventos contendo ambos os sinais) e outro com nove espécies, que admite variáveis faltantes (eventos contendo ambos os sinais ou apenas um deles). Os classificadores combinados incorporam a probabilidade de *T. truncatus* proveniente do meta-classificador de assovios, pois este apresentou melhor desempenho para a espécie durante a validação. Dessa forma, no classificador combinado de assovios e cliques, deve-se substituir a probabilidade de *T. truncatus* gerada pelo classificador de assovios por aquela gerada pelo meta-classificador de assovios. Além disso, é necessário fornecer as coordenadas geográficas do evento acústico (latitude e longitude em graus decimais) entre as variáveis de entrada.

Foram atribuídos pesos distintos a cada tipo de classificador, com base no desempenho observado durante a fase de validação. Foi observado que determinadas espécies apresentaram melhores ou piores resultados na validação a depender do classificador empregado. Para que o resultado agregado reflita essa variação de desempenho entre modelos e espécies, os pesos foram ajustados individualmente para cada combinação. Assim, os pesos atribuídos variam tanto entre os modelos quanto entre as nove espécies consideradas (**Tabela 5.6**).

**Tabela 5.6** - Modelos de classificadores aplicados para o teste de novos dados. Cada modelo gera uma distribuição de probabilidades para as espécies, e são atribuídos pesos específicos conforme o modelo e a espécie. A soma das probabilidades de cada espécie é multiplicada pelo respectivo peso, e o resultado é normalizado pela soma dos pesos ( $\sum$  peso) atribuídos à espécie. A espécie com o maior valor de probabilidade final será a previsão atribuída ao evento. Sigla dos modelos: AS (classificador de assovios), AS-M (meta-classificador de assovios), EC-7sp (cliques sete espécies), EC-9sp (cliques nove espécies), Com-7sp (combinado com sete espécies e eventos com variáveis completas), Com-9sp (combinado com nove espécies e eventos podem ter variáveis faltantes). Os modelos combinados incluem a variável de *T. truncatus* do meta-classificador e a inclusão de latitude e longitude do local do evento acústico como variável. Sigla das espécies: Dd (*Delphinus delphis*), Gg (*Grampus griseus*), Gsp. (*Globicephala sp.*), Sa (*Stenella attenuata*), Sb (*Steno bredanensis*), Sc (*Stenella clymene*), Sf (*Stenella frontalis*), Sl (*Stenella longirostris*), Tt (*Tursiops truncatus*).

Modelo	Dd	Gg	Gsp.	Sa	Sb	Sc	Sf	Sl	Tt
AS	1	-	-	2	2	1	2	1	0,5
AS-M	0,5	-	-	1	1	1	1	1	2
EC-7sp	1	-	-	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5
EC-9sp	1	1,5	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5
AS/EC-7sp	1,5	-	-	1	1	1,5	1	1,5	1,5
AS/EC-9sp	0,5	2	2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$\Sigma$ pesos	<b>5,5</b>	<b>3,5</b>	<b>3</b>	<b>6,5</b>	<b>6,5</b>	<b>5</b>	<b>5,5</b>	<b>5</b>	<b>5,5</b>

A soma das probabilidades de cada espécie é multiplicada pelo seu peso, e o valor resultante é normalizado (dividido pela soma dos pesos das espécies). A previsão de cada evento acústico é ponderada de acordo com os modelos que puderem avaliá-lo. Caso o evento acústico a ser testado contenha apenas um tipo de vocalização, ele será avaliado no seu respectivo classificador (assovios ou cliques), além do classificador combinado de nove espécies, que foi treinado para lidar com variáveis faltantes (podendo ser utilizado em eventos contendo apenas assovios ou cliques). Se o evento acústico contiver ambos os tipos de vocalização, todos os modelos podem ser aplicados, incluindo o classificador combinado de sete espécies (treinado exclusivamente com eventos que possuem todas as variáveis). Os resultados agregados das probabilidades de cada tipo de classificador são então usados para determinar a decisão final de classificação.

## 5.3 DISCUSSÃO

### 5.3.1 Classificador acústico de cliques de delfinídeos

No geral, o desempenho do classificador acústico de cliques de ecolocalização teve um desempenho entre mediano a ruim para a maior parte das espécies. O modelo com sete espécies incluiu as mesmas do modelo de assovios do Capítulo 1. São todas espécies de delfinídeos de pequeno a médio porte. Quatro delas são do gênero *Stenella*, sendo que três delas (*S.longirostris*, *S.clymene* e *S.frontalis*) apresentaram os cliques com maiores dificuldades de classificação, com pontuações médias de sensibilidade que não ultrapassaram 40%. Para *T.truncatus* a pontuação também foi baixa. Já para *S.attenuata* a pontuação foi mediana, assim como *S.bredanensis* (63%) e *D.delphis* (entre 57 a 70%). No entanto, *S.bredanensis* e *D.delphis* tiveram poucos eventos acústicos testados (5 e 7, respectivamente), portanto os resultados devem ser vistos com mais cautela. No modelo de nove espécies, foram adicionadas *Globicephala* sp. (56%) e *G.griseus* (92%), que foi a espécie com os cliques mais distintos. Neste modelo de nove espécies, as outras sete tiveram resultados um pouco abaixo do modelo anterior de sete espécies. Um modelo de nove espécies tem maior espaço de decisão do que um modelo de sete espécies, sendo esperado uma queda no desempenho. O modelo combinado de sete espécies em que foi obtido os melhores resultados foi aquele que incluiu os eventos com ambos os assovios e cliques (amostras completas), sugerindo que amostras incompletas tiveram algum impacto nas previsões. Já o modelo de nove espécies incluindo amostras incompletas teve a vantagem de incluir mais espécies e aproveitou melhor a informação disponível. Além disso, em um cenário real, os dados de entrada podem conter variáveis ausentes (somente assovios ou cliques detectados nas gravações), que somente o modelo combinado com variáveis incompletas pode acomodar.

A análise da importância das variáveis mostrou que os parâmetros temporais, principalmente o intervalo-entre-cliques foi um dos mais importantes no classificador de cliques, sugerindo que o padrão de repetição dos cliques possui informações úteis para classificação. A produção dos cliques e suas propriedades acústicas está intrinsecamente relacionada às estruturas especializadas de fonação, anatomia craniana e relações filogenéticas entre os odontocetos. Os cliques são gerados por um conjunto de estruturas nasais especializadas localizadas na região da laringe,

conhecidas como lábios fônicos (CRANFORD; AMUNDIN; NORRIS, 1996). Após sua geração, os cliques são transmitidos e modulados pelo melão, uma massa de tecido gorduroso presente na região anterior da cabeça, que atua como um projetor acústico, direcionando e potencializando o sinal (MCKENNA et al., 2011). Jensen et al. (2018) mostraram que, de forma geral, existe uma relação entre o tamanho corporal dos odontocetos e a frequência dos cliques de ecolocalização. No entanto, as frequências observadas são de ordens de grandeza significativamente superiores àquelas previstas pela escala alométrica derivada de mamíferos terrestres. Além das características anatômicas e das relações filogenéticas, outros fatores podem influenciar nas diferenças ou similaridades acústicas entre as espécies, como as condições de ruído em diferentes ambientes e os tipos de presas que compõem a dieta das espécies (AU et al., 1993; MADSEN et al., 2004; MADSEN et al., 2007; SIMON; WAHLBERG; MILLER, 2007; ESKesen et al., 2011; LADEGAARD et al., 2015; PEDERSEN et al., 2021).

No presente estudo, a maioria das espécies de delfinídeos incluídas nos classificadores apresenta porte corporal de pequeno a médio, rostro alongado, conformações cranianas relativamente similares e características externas da cabeça compartilhadas, como a morfologia do melão; aspectos que podem contribuir para a semelhança nos padrões acústicos observados. Por exemplo, *Stenella clymene* foi a menor dentre as espécies avaliadas, com adultos atingindo cerca de 2,0 metros de comprimento, enquanto outras espécies, como *S.attenuata*, *S.longirostris*, *S.frontalis* e *S.bredanensis* variam entre 2,3 m e 2,8 m. *T.truncatus*, por sua vez, apresenta maior variação intraespecífica entre populações, podendo alcançar até 3,8 m (JEFFERSON et al., 2015). Dentro da família Delphinidae, essas espécies pertencem à subfamília *Delphininae*, um grupo caracterizado por formas corporais mais esguias, rostro proeminente e relativa uniformidade anatômica (MCGOWEN et al., 2011; AMARAL et al., 2012). A exceção é *S.bredanensis*, que não apresenta um melão tão proeminente e possui um rosto mais longo e estreito em comparação às demais espécies. Em contraste, *Globicephala sp.* e *G.griseus* pertencem à subfamília Globicephalinae, cujos representantes exibem características morfológicas distintas, como a cabeça mais globosa, maior assimetria craniana e ausência de rostro alongado (VILSTRUP et al., 2011). *Globicephala sp.* é considerado um delfinídeo de grande porte, com indivíduos adultos variando entre 5 e 7 metros, enquanto *G.griseus* atinge até 3,8 metros. Apesar das diferenças anatômicas marcantes, os cliques de *Globicephala sp.*

apresentaram sobreposição considerável com os de outros delfinídeos nos classificadores, sugerindo que além de fatores morfológicos, aspectos comportamentais, ecológicos ou contextuais também podem influenciar nas características dos cliques. Estudos que descrevem os cliques de *Globicephala macrorhynchus*, como o de Baumann-Pickering et al. (2015), relataram valores medianos de frequência de pico em torno de 22 kHz no arquipélago do Havaí. No presente estudo foi observado valores consideravelmente mais altos, com mediana em torno de 39 kHz. Essa discrepância pode ser atribuída, ao menos em parte, às diferentes metodologias de aquisição dos dados acústicos: enquanto Baumann-Pickering et al. (2015) utilizaram gravadores fixos posicionados entre 500 e 600 m de profundidade, os registros aqui analisados foram obtidos por meio de arranjos de hidrofones rebocados a aproximadamente 20-30 m de profundidade. A maior profundidade dos gravadores fixos pode atenuar componentes de alta frequência, reduzindo a energia registrada nas faixas superiores do espectro. Por outro lado, os hidrofones rebocados estão mais suscetíveis a ruídos de superfície, como vento, ondas, cavitação dos propulsores e ruído do arrasto. Ainda assim, mesmo com maior energia espectral em altas frequências, *Globicephala* sp. destacou-se, entre as nove espécies do classificador, como uma das espécies com menores valores medianos de frequência de pico, ao lado de *S.bredanensis*, cuja mediana foi de 37 kHz (ver Tabela no Apêndice D). Para *S.bredanensis*, Rankin et al. (2015) coletaram dados na costa oeste dos EUA com a mesma plataforma de aquisição utilizada neste estudo (hidrofones rebocados) e observaram frequências de pico mais baixas, com mediana entre 22 e 25 kHz. Isso sugere que, mesmo utilizando plataformas de coleta similares, os valores registrados podem variar entre estudos, possivelmente em função das características da instrumentação, condições ambientais locais e/ou diferenças geográficas. *S.clymene* também apresentou valores medianos de frequência de pico entre os mais baixos (38,6 kHz) neste estudo, apesar de ser uma das menores espécies de delfinídeos incluídas no classificador acústico. Não há, até o momento, estudos publicados sobre os cliques dessa espécie que permitam comparações diretas. No entanto, os resultados aqui obtidos sugerem que *S.clymene* produz cliques com energia concentrada em frequências mais baixas do que outros delfinídeos de tamanho corporal semelhante. No caso de *G.griseus*, estudos mostram que os cliques possuem picos de frequência característicos no espectro que podem ser usados para identificar a espécie (SOLDEVILLA et al., 2008; SOLDEVILLA et al., 2017). Entre as

nove espécies incluídas no classificador de cliques, *G.griseus* foi a única que se destacou com desempenho superior a 90%.

Estudos recentes utilizaram cliques coletados em ampla escala geográfica para a classificação de odontocetos por meio de métodos de aprendizado de máquina (FRAISER et al., 2017; YANG; ZHANG, 2020; COHEN et al., 2022; ZIEGENHORN et al., 2022; RANKIN et al., 2024). Frasier et al. (2017) classificaram cliques com base nas frequências com maior concentração de energia e no intervalo entre cliques, utilizando dados coletados por gravadores autônomos no Golfo do México, sem confirmação visual das espécies. Sete tipos distintos de cliques foram identificados por meio de análise não supervisionada (agrupamento), presumivelmente correspondentes a diferentes espécies, sendo possível confirmar a identidade de uma delas (*G.griseus*). Utilizando abordagem similar com dados do Atlântico Norte, Cohen et al. (2022) identificaram seis padrões de cliques atribuídos presumivelmente a *G.griseus*, *G.macrorhynchus* e *D.delphis*, além de um quarto padrão possivelmente relacionado à família Globicephalinae e dois outros sem identificação. No arquipélago do Havaí, Ziegenhorn et al. (2022) também utilizaram dados de gravadores autônomos, complementados por registros com confirmação visual das espécies, para identificar dez tipos de cliques atribuídos a diferentes delfinídeos e outros odontocetos. Estudos com métodos supervisionados também evidenciam o potencial de identificação de espécies por meio de cliques. Roch et al. (2011), por exemplo, extraíram características cepstrais de cliques de seis espécies (cinco delfinídeos e uma de zifídeo) e aplicaram modelos de mistura gaussiana para classificação. Os dados foram divididos de forma a preservar a independência dos eventos acústicos entre treinamento e teste. A acurácia média foi de 78%, variando amplamente entre as espécies, desde 98% para a espécie de zifídeo até 32% para *T.truncatus*. No leste da África, Yang et al. (2020) coletaram cliques de duas espécies costeiras, o golfinho-corcunda (*Sousa plumbea*) e o golfinho-nariz-de-garrafa do Indo-Pacífico (*Tursiops aduncus*), aplicando um classificador baseado em floresta randômica. A acurácia geral foi de 73%, mas com diferenças marcantes entre as espécies (28% para *S.plumbea* e 90% para *T.aduncus*). No presente estudo, o classificador de cliques validado obteve uma acurácia média balanceada de 49% na classificação de eventos acústicos. Embora algumas espécies tenham apresentado bons resultados, muitas obtiveram desempenhos medianos a baixos. É importante destacar que o presente classificador, que abrange nove espécies e utiliza dados coletados ao longo de vários anos em uma

área geográfica relativamente ampla, lida com um cenário de alta complexidade. Essa complexidade é especialmente relevante entre as espécies de pequenos delfinídeos, que frequentemente compartilham porte corporal, características anatômicas, comportamentos e nichos ecológicos semelhantes.

### 5.3.2 Classificador acústico combinado de assovios e cliques de delfinídeos

Neste estudo, o classificador combinado teve desempenho semelhante ao classificador de assovios, quando treinado com sete espécies de delfinídeos de pequeno a médio porte. Espécies como *S.bredanensis*, *S.attenuata* e *S.frontalis* apresentaram desempenho superior no classificador de assovios em comparação ao combinado. Por outro lado, para espécies como *D.delphis*, *S.clymene* e *S.longirostris*, os resultados foram semelhantes entre os classificadores, ou ligeiramente melhores no modelo combinado. A espécie *T.truncatus* obteve seu melhor desempenho no meta-classificador baseado em assovios. Assim, observa-se que, para determinadas espécies, a combinação de assovios e cliques resultou em acurárias similares, ou até inferiores, às obtidas com o uso exclusivo de assovios. Isso pode indicar que o modelo combinado atribui peso excessivo ao classificador de cliques, o que pode comprometer a acurácia em alguns casos. Tal padrão sugere que os cliques têm contribuição limitada, ou no melhor cenário, marginal, para a melhora do desempenho geral.

Vale destacar que o classificador combinado foi treinado com um número significativamente menor de amostras (49 eventos acústicos, sendo sete para cada espécie no modelo de nove espécies), em contraste com as centenas de amostras individuais de assovios e milhares de cliques disponíveis para o treino de seus respectivos classificadores. Essa discrepância na quantidade de dados pode ter impactado negativamente o desempenho do modelo combinado, uma vez que os cliques parecem introduzir maior variabilidade e ruído, enquanto os assovios se mostraram mais informativos. Ainda assim, foi possível alcançar acurárias de medianas a boas. No entanto, espécies como *S.attenuata*, *S.frontalis*, *S.longirostris*, *T.truncatus* e *Globicephala* sp. apresentaram maiores desvios padrão nas dez execuções do modelo combinado, refletindo maior sensibilidade à aleatoriedade dos dados de treinamento. Esses resultados reforçam a hipótese de que, com um número

maior de amostras (eventos acústicos) no treinamento, há potencial para melhorias significativas no desempenho do classificador combinado.

Duas espécies (*Globicephala* sp. e *G.griseus*) apresentaram quantidade insuficiente de assovios e, por isso, ficaram de fora do classificador baseado em assovios. Na maioria das gravações, essas espécies produziram predominantemente cliques de ecolocalização ou outros sons pulsados. Esse comportamento acústico contrasta com o das outras sete espécies, nas quais tanto assovios quanto cliques foram comumente registrados. Um repertório rico de sons pulsados utilizados na comunicação já foi descrito para *Globicephala* (SAYGH et al., 2013; VAN CISE et al., 2018). Apesar da baixa ocorrência de assovios nas gravações analisadas, sons pulsados foram mais comuns, muitas vezes em forma de sinais longos, com aspectos tonais e bandas laterais (WATKINS, 1967), semelhantes aos descritos para a baleia-orca (*Orcinus orca*) (FORD et al., 1991). Para *G.griseus*, os sons pulsados registrados foram geralmente mais curtos e isolados (ARRANZ et al., 2016). A inclusão futura de sons pulsados no classificador pode beneficiar espécies cuja comunicação vocal não se baseia predominantemente em assovios, como *Globicephala* sp. e *O.orca* (SAYGH et al., 2013; FILATOVA et al., 2013; COURTS et al., 2020), ampliando a aplicabilidade e a robustez do modelo. Para *Globicephala* sp. o classificador combinado melhorou a pontuação substancialmente comparado aos resultados dos cliques (91% contra 56%). Para *G.griseus* a pontuação chegou a 97%, comparado a uma já boa pontuação de 92% do classificador de cliques, indicando que estas espécies possuem cliques mais distintos. A própria ausência das variáveis de assovios pode ser uma das características consideradas pelo modelo. Além disso, o classificador combinado também incorporou variáveis não acústicas, como as coordenadas geográficas, que contribuíram para os resultados, evidenciando que a distribuição espacial das espécies pode ser informativa para o processo de classificação. No caso de *Globicephala* sp. e *G.griseus*, trata-se de espécies oceânicas, comumente registradas na região do talude. Em um levantamento de cetáceos realizado no talude das regiões Sul e Sudeste do Brasil, a baleia-piloto-de-peitorais-longas (*Globicephala melas*) foi um dos delfinídeos de maior porte mais frequentes, com registros concentrados na região Sul, em latitudes acima de 27°S (DI TULLIO et al., 2016). No presente estudo, o limite sul da área de amostragem foi a latitude de 27,5°S. Devido à dificuldade de identificação em campo, a confirmação da espécie de *Globicephala* foi feita somente para os grupos que tiveram amostras de tecido (biópsias) coletadas para identificação

genética. Todos os indivíduos biopsiados foram identificados como da espécie baleia-piloto-de-peitorais-curtas (*Globicephala macrorhynchus*) (PETROBRAS, 2024). Isso sugere que *G.macrorhynchus* é mais comum nessa porção ao norte da latitude de 27°, ainda que a área possa corresponder a uma zona de simpatria com *G.melas*. Essas observações estão de acordo com a distribuição global de *G.macrorhynchus*, que tende a ser mais tropical quando comparada à de *G. melas* (OLSON et al., 2009). Outras espécies de globicefálineos registradas na área de estudo incluem a falsa-orca (*Pseudorca crassidens*), a orca-pigméia (*Feresa attenuata*) e o golfinho-cabeça-de-melão (*Peponocephala electra*). Embora tenham sido coletadas amostras de assovios e cliques dessas espécies ao longo do estudo, o número de eventos acústicos foi insuficiente para alimentar o classificador, o que não impede de serem incluídas no futuro, mediante a disponibilidade de mais amostras.

O fato de os assovios terem tido mais sucesso na classificação das espécies, principalmente para os delfinídeos de pequeno a médio porte, sugere que os assovios carregam mais características espécie-específicas do que os cliques. Os assovios são usados na comunicação, podendo ter funções como coesão do grupo, chamados de contato e até mesmo identificação individual de membros do grupo, como o caso dos “assovios-assinatura” de *T.truncatus* (JANIK; SAYGH, 2013) e possivelmente de outras espécies (RIO, 2023; RAMOS et al., 2023). Como esses sons têm uma função social complexa, é vantajoso que apresentem características acústicas distintas entre espécies e indivíduos. Enquanto os assovios podem codificar identidade individual e interações sociais específicas, os cliques seguem restrições funcionais mais rígidas ligadas à ecolocalização. Como a ecolocalização é uma função sensorial mais relacionada às propriedades físicas do ambiente (como a reflexão do som em diferentes superfícies), os cliques tendem a ser moldados mais por necessidades acústicas funcionais do que por variação espécie-específica. Assim, é comum que cliques tenham padrões semelhantes entre espécies de golfinhos que compartilham hábitos ecológicos similares. Além disso, o tamanho e a forma do crânio, a estrutura do melão e o aparato vocal também influenciam na produção dos cliques (MADSEN; SURLYKKE, 2013; JENSEN et al., 2018; KURODA; MIKI ; MATSUISHI, 2020; LAETA et al., 2023). Isso faz com que as diferenças entre as espécies nos cliques sejam mais previsíveis com base na anatomia e ecologia, enquanto os assovios podem evoluir de forma mais plástica para atender a necessidades sociais específicas.

A extração e processamento dos cliques foram feitas de forma automatizada, através de um algoritmo para identificar os cliques biológicos de odontocetos através de padrões de intervalo de cliques, amplitude, variações do ângulo de direção e conteúdo espectral (MACAULAY, 2020). Ainda que isso contribuiu para reduzir a quantidade de falsos positivos não é possível afirmar que os dados estejam totalmente livres de ruídos. Os cliques, além de estarem mais sujeitos a variações de ruído, também podem ser influenciados por diferenças entre instrumentações e plataformas de coleta (ROCH et al., 2015; BAUMANN-PICKERING et al. 2015). Neste estudo, foram 18 cruzeiros de coleta, sendo apenas no primeiro que os equipamentos eletrônicos (placas de aquisição, amplificadores e filtros) foram diferentes. Variações no ajuste do ganho nos primeiros cruzeiros também podem ter afetado o desempenho do detector de alguma forma. Os hidrofones e pré-amplificadores foram os mesmos em quase todos os cruzeiros. Não foi avaliado em que extensão isso afetou o detector e o classificador. Como na maior parte dos dados os eletrônicos, hidrofones e pré-amplificadores foram os mesmos, espera-se que seu efeito nos resultados seja pequeno. Quanto à análise e seleção das amostras de assovios, o processamento foi feito manualmente por analistas experientes e estão livres de falsos positivos. Foram aplicados critérios para garantir a qualidade e consistência das amostras selecionadas. Foram considerados apenas os assovios de boa qualidade em que o contorno completo pudesse ser traçado. Também foram definidos critérios para separação de assovios quando produzidos em sequência ou com pouca sobreposição. Evitou-se selecionar assovios fracos ou fragmentados que pudessem gerar ambiguidades em relação ao seu contorno. Estes fatores podem ter colaborado para uma maior consistência e melhores resultados dos assovios. Os assovios também podem ser processados a partir de métodos automatizados, o que é uma vantagem, pois diminui o tempo de processamento e viabiliza a sua aplicação num grande volume de dados. Gillespie et al. (2013) empregou um detector automático de assovios desenvolvido no programa PamGuard para detectar e classificar assovios de espécies de delfinídeos coletados em diferentes regiões do Atlântico Norte. O detector teve um bom desempenho, detectando cerca de 88% dos assovios anotados manualmente, além de um baixo número de falsos positivos. Uma das dificuldades destes detectores é que geralmente os assovios são detectados parcialmente ou fragmentados. No caso de assovios sobrepostos, as detecções podem conter fragmentos de mais de um assvio. Para cada assvio inteiro reportado por Gillespie

et al. (2013) foram em média 1,9 detecções de segmentos de assovios assinalados pelo detector e o desempenho do classificador variou de acordo com o comprimento dos fragmentos. Gillespie et al. (2013) também alertaram que quando se aplica detectores automáticos existe o risco de que os modelos treinados aprendam artefatos, como características específicas do equipamento, variações de ruído ou da propagação acústica. No presente estudo, como a análise dos assovios foi manual, isto não foi um problema e garantiu que assovios inteiros fossem selecionados e processados. No entanto, a desvantagem é que a aplicação da metodologia manual em grandes volumes de dados se torna mais trabalhosa.

Raking et al. (2017) aplicou detectores automáticos de assovios, cliques e sons pulsados de sete espécies na região da Califórnia, EUA e desenvolveu classificadores para cada tipo de vocalização, que resultaram em valores de acurácia medianos (43% a 49%). Neste mesmo estudo, um modelo de classificador combinado de eventos acústicos, similar ao aqui apresentado, incluiu as probabilidades dos classificadores de cada um dos três tipos de vocalizações. Foi observada uma melhora substancial da acurácia (84%). Os resultados do classificador combinado de assovios e cliques do presente estudo alcançou uma acurácia balanceada média de 76% (variando entre 72% a 81%) para um modelo de sete espécies. No modelo de classificação de assovios a pontuação média foi maior (80%), sugerindo que os assovios processados manualmente foram bons preditores das espécies, enquanto os cliques detectados automaticamente contribuíram menos na classificação. A depender da espécie, o desempenho do classificador combinado até diminui comparado aos assovios. Seria interessante desenvolver um classificador com os mesmos dados de assovios, mas desta vez processados a partir de detectores automáticos, para efeitos de comparação com os resultados da análise manual. Um classificador combinado de assovios e cliques, desenvolvido a partir de detectores automáticos, como aplicado em Raking et al. (2017), pode representar uma economia de tempo e recursos, se bem-sucedido.

## 5.4 CONCLUSÕES

Os modelos desenvolvidos retornam probabilidades associadas a cada espécie, as quais foram utilizadas para treinar meta-classificadores acústicos e combinar diferentes tipos de vocalizações (assovios e cliques). Propõe-se que, para a previsão de novos dados, seja utilizada uma abordagem de agregação ponderada das probabilidades fornecidas pelos diferentes modelos. Essa estratégia permite atenuar as variações individuais entre modelos, resultando em uma previsão mais robusta e estável. Foram selecionados seis modelos base (classificadores de assovios, cliques e modelos combinados) e atribuídos pesos específicos a cada um, refletindo sua contribuição relativa na identificação de cada espécie. Essa ponderação levou em consideração o desempenho individual dos modelos por espécie, de forma a otimizar a acurácia geral de novas previsões. A estratégia tira proveito da maior previsibilidade de determinados modelos e espécies, favorecendo uma decisão final mais confiável. Os modelos treinados incluem versões de sete e nove espécies e os dados de entrada podem ser assovios e cliques. A implementação prática envolve o processamento de dados acústicos de delfinídeos, de forma manual para os assovios (ROCCA) (OSWALD; OSWALD, 2013) e um detector automático de cadeia de cliques (MACAULAY, 2020), ambos parte integrante do software PAMGuard (GILLESPIE et al., 2008) de livre acesso e bastante difundido em aplicações similares. Futuramente, a automatização do processamento de assovios pode contribuir para diminuir o tempo de processamento e permitir maior aplicabilidade do método em grandes volumes de dados. Para isso, os assovios precisariam ser processados nos detectores e novamente treinados e validados. Alternativamente, o detector de assovios do PAMGuard pode servir para identificação dos trechos de gravações com assovios no caso de grandes volumes de dados coletados de forma autônoma. Após esta etapa, as amostras de assovios podem ser selecionadas e processadas manualmente, conforme a metodologia aqui descrita. As amostras processadas podem então ser utilizadas como dados de entrada para fazer as previsões através dos modelos de classificadores e a agregação ponderada das probabilidades para uma predição final.

Um classificador acústico robusto de espécies de delfinídeos é uma importante ferramenta nas aplicações de tecnologias de monitoramento acústico passivo. Foi demonstrado o potencial do uso de detectores e classificadores acústicos de nove

espécies de delfinídeos da Bacia de Santos. Foram exploradas suas potencialidades, limitações e aplicações como uma ferramenta de monitoramento ambiental. A tarefa de detectar e classificar cetáceos através da acústica colabora para estudos sobre a ecologia das espécies e traz vantagens, como um elevado custo-benefício em termos de gastos e logística, podendo inclusive ser implementado em plataformas de oportunidade (WEBBER et al., 2022). O uso de diferentes plataformas e tecnologias atuais permitem monitorar acusticamente grandes porções do oceano em diferentes escalas espaciais e temporais. Os classificadores podem ser atualizados através de um aprendizado contínuo, conforme a disponibilidade e acúmulo de mais dados para os modelos, possibilitando a inclusão de novas espécies. Neste sentido, o desempenho pode ser avaliado periodicamente, inclusive com eventuais redistribuições dos pesos dos modelos para uma decisão final. Um esforço integrado para padronizar os procedimentos de extração de características, detecção e classificação de cetáceos, como apresentado aqui, pode ser continuamente aprimorado. Esses avanços podem trazer benefícios significativos para a comunidade científica, agências ambientais e partes interessadas envolvidas na mitigação de impactos e na conservação de cetáceos.

## REFÉRENCIAS

- AMARAL, Ana R. et al. Species tree of a recent radiation: the subfamily Delphininae (Cetacea, Mammalia). **Molecular Phylogenetics and Evolution**, v. 64, n. 1, p. 243-253, 2012.
- ARRANZ, P. et al. Discrimination of fast click-series produced by tagged Risso's dolphins (*Grampus griseus*) for echolocation or communication. **Journal of Experimental Biology**, v. 219, n. 18, p. 2898-2907, 2016.
- AU, Whitlow W. **The sonar of dolphins**. New York: Springer-Verlag, 1993.
- BAUMANN-PICKERING, Simone et al. Species-specific beaked whale echolocation signals. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 134, n. 3, p. 2293-2301, 2013.
- BAUMANN-PICKERING, Simone et al. False killer whale and short-finned pilot whale acoustic identification. **Endangered Species Research**, v. 28, n. 2, p. 97-108, 2015.
- COHEN, Rebecca E. et al. Identification of western North Atlantic odontocete echolocation click types using machine learning and spatiotemporal correlates. **PLoS one**, v. 17, n. 3, p. e0264988, 2022.
- COURTS, Rachael et al. Australian long-finned pilot whales (*Globicephala melas*) emit stereotypical, variable, biphonic, multi-component, and sequenced vocalisations, similar to those recorded in the northern hemisphere. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 20609, 2020.
- CRANFORD, Ted W.; AMUNDIN, Mats; NORRIS, Kenneth S. Functional morphology and homology in the odontocete nasal complex: implications for sound generation. **Journal of Morphology**, v. 228, n. 3, p. 223-285, 1996.
- DI TULLIO, Juliana Couto et al. Diversity and distribution patterns of cetaceans in the subtropical southwestern Atlantic outer continental shelf and slope. **PLoS One**, v. 11, n. 5, p. e0155841, 2016.
- ESKESEN, Ida G. et al. Comparison of echolocation clicks from geographically sympatric killer whales and long-finned pilot whales (L). **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 130, n. 1, p. 9-12, 2011.
- FILATOVA, Olga A. et al. Dependence of killer whale (*Orcinus orca*) acoustic signals on the type of activity and social context. **Biology Bulletin**, v. 40, p. 790-796, 2013.
- FRASIER, Kaitlin E. et al. Automated classification of dolphin echolocation click types from the Gulf of Mexico. **PLoS computational biology**, v. 13, n. 12, p. e1005823, 2017.
- FORD, John KB. Vocal traditions among resident killer whales (*Orcinus orca*) in coastal waters of British Columbia. **Canadian Journal of Zoology**, v. 69, n. 6, p. 1454-1483, 1991.
- GILLESPIE, Douglas, et al. Automatic detection and classification of odontocete whistles. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 134, n. 3, p. 2427-2437, 2013.

GILLESPIE, Douglas et al. PAMGuard: Semiautomated, opensource software for real-time acoustic detection and localisation of cetaceans. **Proceedings of the Institute of Acoustics**, v.30, n.5, 2008.

GRIFFITHS, Emily T. et al. Detection and classification of narrow-band high frequency echolocation clicks from drifting recorders. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 147, n. 5, p. 3511-3522, 2020.

JENSEN, Frants H. et al. Narrow acoustic field of view drives frequency scaling in toothed whale biosonar. **Current Biology**, v. 28, n. 23, p. 3878-3885. e3, 2018.

KURODA, Mika; MIKI, Nobuhiro; MATSUISHI, Takashi Fritz. Determinants of echolocation click frequency characteristics in small toothed whales: recent advances from anatomical information. **Mammal Review**, v. 50, n. 4, p. 413-425, 2020.

LADEGAARD, Michael et al. Amazon river dolphins (*Inia geoffrensis*) use a high-frequency short-range biosonar. **Journal of Experimental Biology**, v. 218, n. 19, p. 3091-3101, 2015.

LAETA, Maíra et al. Cranial asymmetry in odontocetes: a facilitator of sonic exploration? **Zoology**, v. 160, p. 126108, 2023.

MACAULAY, Jamie Donald John. **Passive acoustic monitoring of harbour porpoise behaviour, distribution and density in tidal rapid habitats**. 2020. 273 f. Tese de Doutorado - University of St Andrews, Saint Andrews, 2018.

MCGOWEN, Michael R. Toward the resolution of an explosive radiation - a multilocus phylogeny of oceanic dolphins (Delphinidae). **Molecular Phylogenetics and Evolution**, v. 60, n. 3, p. 345-357, 2011.

MCKENNA, Megan F. et al. Morphology of the odontocete melon and its implications for acoustic function. **Marine Mammal Science**, v. 28, n. 4, p. 690-713, 2012.

MADSEN, P. T.; KERR, I.; PAYNE, R. Echolocation clicks of two free-ranging, oceanic delphinids with different food preferences: false killer whales *Pseudorca crassidens* and Risso's dolphins *Grampus griseus*. **Journal of Experimental Biology**, v. 207, n. 11, p. 1811-1823, 2004.

MADSEN, Peter Teglberg et al. Clicking for calamari: toothed whales can echolocate squid *Loligo pealeii*. **Aquatic Biology**, v. 1, n. 2, p. 141-150, 2007.

MADSEN, P. T.; SURLYKKE, Annemarie. Functional convergence in bat and toothed whale biosonars. **Physiology**, v. 28, n. 5, p. 276-283, 2013.

OLSON, Paula A. Pilot Whales: *Globicephala melas* and *G. macrorhynchus*. In: **Encyclopedia of marine mammals**. Academic Press, 2009. p. 847-852.

OSWALD, J. N.; OSWALD, M. ROCCA (Real-time Odontocete Call Classification Algorithm) User's Manual. prepared for Naval Facilities Engineering Command Atlantic, Norfolk, Virginia under HDR Environmental, Operations and Construction, Inc., Contract No. CON005-4394-009, Subproject, v. 164744, 2013.

RAMOS, Eric A. et al. Signature whistle use and changes in whistle emission rate in a rehabilitated rough-toothed dolphin. **Frontiers in Marine Science**, v. 10, p. 1278299, 2023.

- RANKIN, Shannon et al. Vocalizations of the rough-toothed dolphin, *Steno bredanensis*, in the Pacific Ocean. **Marine Mammal Science**, v. 31, n. 4, 2015.
- RANKIN, Shannon et al. Acoustic classification of dolphins in the California Current using whistles, echolocation clicks, and burst pulses. **Marine Mammal Science**, v. 33, n. 2, p. 520–540, 2017.
- RANKIN, Shannon, et al. Open-source machine learning BANTER acoustic classification of beaked whale echolocation pulses. **Ecological Informatics**, v. 80, p. 102511, 2024.
- RIO, Raul. First acoustic evidence of signature whistle production by spinner dolphins (*Stenella longirostris*). **Animal Cognition**, v. 26, n. 6, p. 1915-1927, 2023.
- ROCH, Marie A. et al. Classification of echolocation clicks from odontocetes in the Southern California Bight. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 129, n. 1, p. 467-475, 2011.
- ROCH, Marie A. et al. Compensating for the effects of site and equipment variation on delphinid species identification from their echolocation clicks. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 137, n. 1, p. 22-29, 2015.
- SIMON, Malene; WAHLBERG, Magnus; MILLER, Lee A. Echolocation clicks from killer whales (*Orcinus orca*) feeding on herring (*Clupea harengus*). **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 121, n. 2, p. 749-752, 2007.
- PEDERSEN, M. B. et al. Echolocation click parameters of short-finned pilot whales (*Globicephala macrorhynchus*) in the wild. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 149, n. 3, p. 1923-1931, 2021.
- PETROBRAS. **9º Relatório Anual do Projeto de Monitoramento de Cetáceos na Bacia de Santos (PMC-BS)**. Relatório técnico. Florianópolis: Socioambiental Consultores Associados, 2024. Disponível em: Projeto de Monitoramento de Cetáceos(PMC) | Comunica Bacia de Santos | Petrobras.
- SAYIGH, Laela et al. Repeated call types in short-finned pilot whales, *Globicephala macrorhynchus*. **Marine Mammal Science**, v. 29, n. 2, p. 312-324, 2013.
- SOLDEVILLA, Melissa S. et al. Classification of Risso's and Pacific white-sided dolphins using spectral properties of echolocation clicks. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 124, n. 1, p. 609-624, 2008.
- SOLDEVILLA, Melissa S. et al. Geographic variation in Risso's dolphin echolocation click spectra. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 142, n. 2, p. 599-617, 2017.
- VAN CISE, Amy M. et al. Song of my people: Dialect differences among sympatric social groups of short-finned pilot whales in Hawai'i. **Behavioral Ecology and Sociobiology**, v. 72, p. 1-13, 2018.
- VILSTRUP, Julia T. et al. Mitogenomic phylogenetic analyses of the Delphinidae with an emphasis on the Globicephalinae. **BMC evolutionary biology**, v. 11, p. 1-10, 2011.
- YANG, Wuyi; LUO, Wenyu; ZHANG, Yu. Classification of odontocete echolocation clicks using convolutional neural network. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 147, n. 1, p. 49-55, 2020.

- WATKINS, William. A. The harmonic interval: Fact or artifact in spectral analysis of pulse trains. In: **Marine Bioacoustics 2**, Pergamon, New York, 1967. p. 15-43.
- WEBBER, Thomas et al. Streamlining analysis methods for large acoustic surveys using automatic detectors with operator validation. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 13, n. 8, p. 1765-1777, 2022.
- ZIEGENHORN, Morgan A. et al. Discriminating and classifying odontocete echolocation clicks in the Hawaiian Islands using machine learning methods. **Plos one**, v. 17, n. 4, p. e0266424, 2022.

## CAPÍTULO 3

### **6 DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE CLIQUES DE ECOLOCALIZAÇÃO DE ODONTOCETOS DAS FAMÍLIAS Physeteridae, Kogiidae, Ziphiidae e Pontoporiidae NA BACIA DE SANTOS**

#### **6.1 MATERIAIS E MÉTODOS**

##### **6.1.1 Cliques de odontocetos das famílias Physeteridae, Kogiidae, Ziphiidae e Pontoporiidae**

Os cliques de ecolocalização de odontocetos das famílias Physeteridae, Kogiidae, Ziphiidae e Pontoporiidae foram obtidos a partir de gravações de campo, nas quais as detecções acústicas foram associadas a grupos específicos de cetáceos, sem necessidade de confirmação visual. Entre os cliques de odontocetos, podem ser distinguidos quatro tipos com base em características observáveis nos gráficos do detector de cliques, conforme descrito no item 3.3.3 — “Associação entre as detecções visuais e acústicas de cetáceos” desta tese. Essas detecções foram posteriormente validadas manualmente, a fim de confirmar a identificação dos diferentes tipos de cliques. Esses incluem os cliques dos cachalotes (*Physeter macrocephalus*, família Physeteridae), dos cachalotes-anão e pigmeu (família Kogiidae), das baleias-bicudas (família Ziphiidae) e das toninhas (*Pontoporia blainvilliei*, família Pontoporiidae). As gravações foram coletadas nas campanhas de Embarcadas de Avistagem e MAP (AEMAP) do PMC-BS/Petrobras utilizando o par de alta frequência do arranjo de hidrofones rebocado (taxa de amostragem de 500 kHz).

##### **6.1.2 Detecção e classificação automática dos cliques de Physeteridae, Kogiidae, Ziphiidae e Pontoporiidae**

A detecção automática dos cliques foi realizada no PAMGuard (versão 2.02.10) utilizando o módulo “Click Train Detector” (MCAULLY, 2020) em conjunto com o detector de cliques padrão do PAMGuard (GILLESPIE et al., 2008), conforme descrito no Capítulo 2 (item 5.1.1.1 — “Detecção automática dos cliques”). O detector foi configurado para o intervalo de 5 a 150 kHz, aplicando um filtro digital Butterworth de

quarta ordem e um limiar de detecção de 16 dB (relação sinal/ruído). As detecções foram armazenadas nos formatos binário e SQLite do PAMGuard.

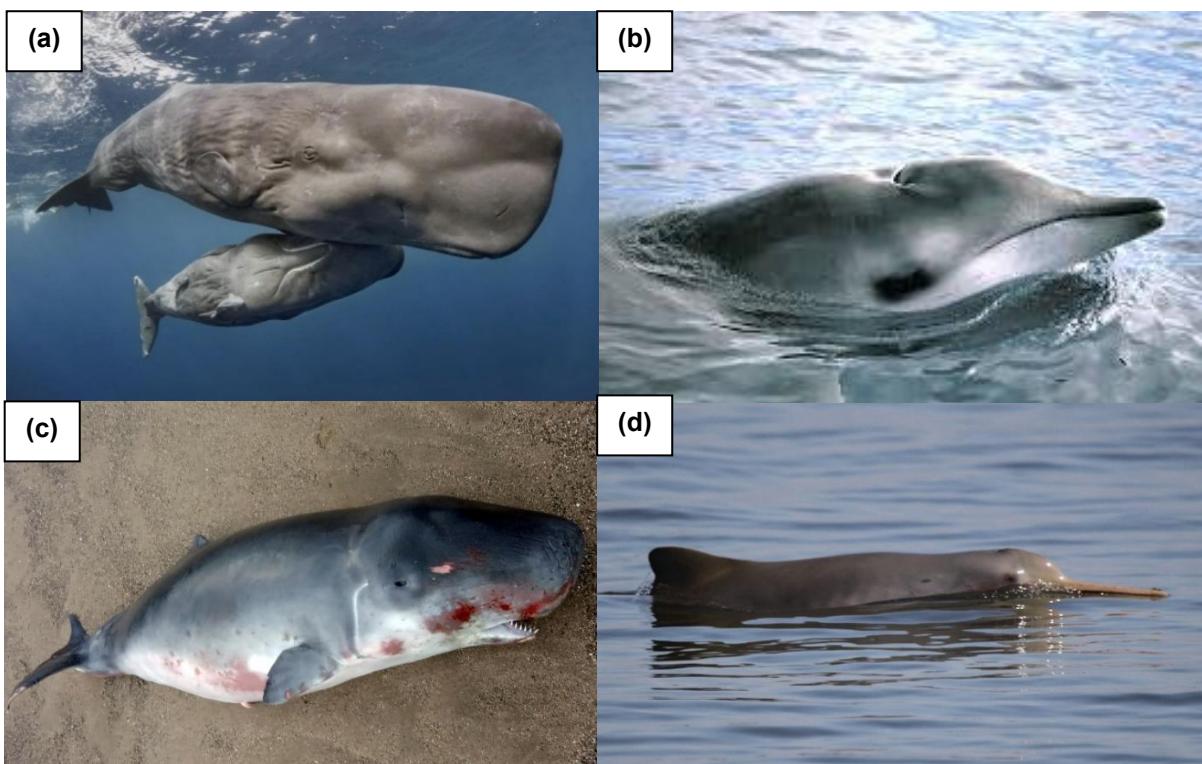
Para a classificação dos cliques do cachalote foi aplicado um modelo “template” do espectro disponível no módulo “Click Train Detector” do PAMGuard (“Sperm Whale”) e definido com um limiar de correlação em 0,5. Para os cliques dos zifídeos (cliques de alta frequência e banda estreita ou NBHF) foi gerado um “template” customizado do espectro a partir de uma amostra de cliques coletados em campo, que foi então inserido nas configurações de classificação do “Click Train Detector”. Para os zifídeos, as detecções se limitaram a poucas cadeias de cliques ou, em alguns casos, a cliques isolados, frequentemente não detectados pelo Click Train Detector (falsos negativos). Por esse motivo, utilizou-se apenas o detector de cliques padrão do PAMGuard. As detecções corresponderam, portanto, a cliques individuais, sem a identificação ou classificação das sequências de cliques. O classificador nesse caso é baseado em comparações de bandas de frequência teste e controle e nos picos de frequência do espectro dos cliques detectados. No caso de zifídeos, além das configurações no espectro do classificador, também foi adicionado parâmetros da forma da onda, especificamente o número de passagens por zero (“zero crossings”) e modulação de frequência (kHz/ms), que caracterizam os cliques de frequência modulada (FM - “Frequency modulated”) dos zifídeos (YACK et al., 2010). Uma vez que os zifídeos englobam muitas espécies, estes classificadores foram configurados para explorar diferentes bandas de frequências, que talvez sejam ocupadas por diferentes espécies. Foram definidos dois classificadores, com diferenças no espectro de frequências, sendo uma banda de frequência “média” entre 25 e 50 kHz (MF) e uma banda de frequência “alta” entre 40 e 80 kHz (HF). Por último, cliques do tipo NBHF coletados em ambiente costeiro (<40m) presente nos dados foram associados à toninha (*Pontoporia blainvillii*) (MELCÓN; FAILLA; IÑÍGUEZ, 2012). Foram poucas detecções da toninha, e como para os zifídeos, foi aplicado somente o detector de cliques padrão do PAMGuard, configurado para classificar cliques NBHF (banda de teste entre 100 a 140 kHz).

### 6.1.3 Caracterização dos cliques de odontocetos das famílias Physeteriidae, Kogiidae, Ziphiidae e Pontoporiidae

Inicialmente, realizou-se a filtragem dos arquivos SQLite contendo os cliques detectados, de acordo com a classificação, mantendo agrupados aqueles identificados como cachalote, zifídeos ou NBHF pelos classificadores do PAMGuard. A análise dos cliques foi realizada com o pacote PAMPAL (versão 1.0.6) no ambiente R (versão 4.4.3). Os cliques extraídos foram filtrados entre 10 e 100 kHz para delfinídeos e zifídeos, entre 100 e 170 kHz para cliques do tipo NBHF, e entre 5 e 50 kHz para cachalotes. O tamanho da janela foi mantido em 1024 pontos (2 ms), e apenas os cliques do primeiro canal foram considerados para análise. Para a caracterização dos cliques foram sumarizadas variáveis comumente reportadas na literatura para cliques de ecolocalização (AU et al., 1993), como o pico de frequência, larguras da banda em -3 dB e -10 dB (kHz), fator de ressonância Q (frequência central/largura da banda) em -3 dB e -10 dB, duração ( $\mu$ s) e intervalo-entre-cliques. As análises incluíram ilustrações da forma da onda e do espectrograma de cliques individuais, o espectro médio e o espectrograma concatenado do conjunto dos cliques, além de histogramas do pico de frequência e do intervalo-entre-cliques. As características observadas foram comparadas com as descrições reportadas na literatura na tentativa de confirmar a identificação dos grupos no menor nível taxonômico possível. No caso das baleias-bicudas (zifídeos), diversas espécies possuem distribuição conhecida ou presumida para águas tropicais do Atlântico Sul Ocidental (MACLEOD et al., 2006; LODI; BOROBIA, 2013). Considerando essa diversidade, cada evento acústico de zifídeo foi tratado como independente, levando em conta a possibilidade de que os registros possam corresponder a espécies distintas.

## 6.2 RESULTADOS

Com base nas detecções dos diferentes grupos, foi feita uma análise detalhada das características dos cliques. Os resultados referem-se principalmente a grupos de cetáceos de mergulho profundo (Physeteridae, Kogiidae, Ziphiidae), (**Figura 6.1a-c**), mas incluem também, de forma preliminar, registros de cliques da toninha (Família Pontoporiidae), um pequeno odontoceto que se distribui em águas costeiras (**Figura 6.1d**).



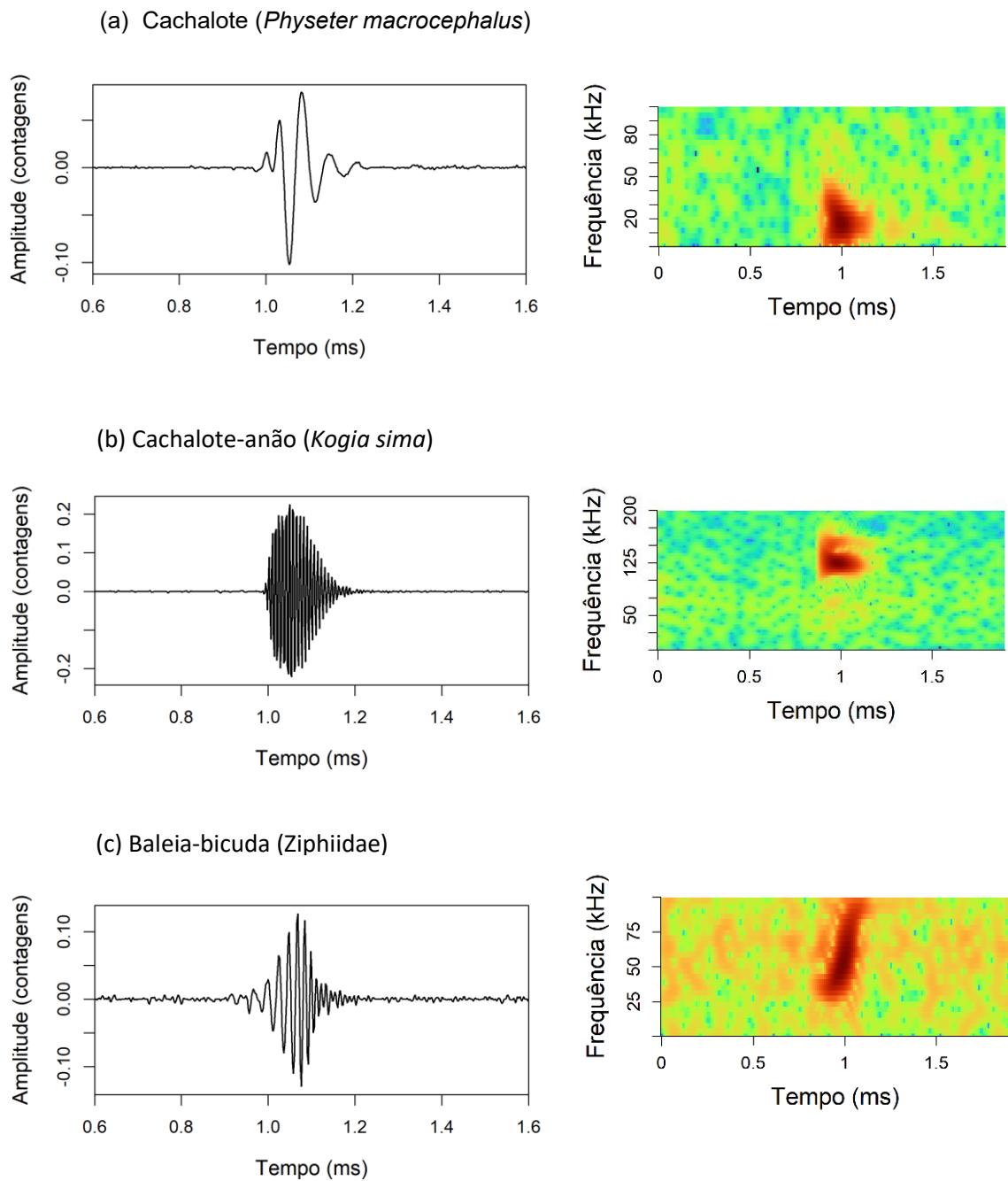
**Figura 6.1** - Espécies representativas das quatro famílias de odontocetos analisadas quanto à detecção e classificação automática de cliques de ecolocalização: (a) Physeteridae: cachalote (*Physeter macrocephalus*), (b) Ziphiidae: baleia-bicuda-de-Gervais (*Mesoplodon europaeus*), (c) Kogiidae: cachalote-pigmeu (*Kogia breviceps*) e (d) Pontoporiidae: (*Pontoporia blainvillei*). Créditos: [www.noyocenter.org](http://www.noyocenter.org), [www.wdg.com](http://www.wdg.com), [www.oriokohegaztiak.com](http://www.oriokohegaztiak.com) e [toninhasdobrasil.com.br](http://toninhasdobrasil.com.br).

### 6.2.1 Família Physeteridea

Foram processados eventos acústicos de cliques de ecolocalização de 15 grupos de cachalotes. Desses, sete tiveram confirmação visual da espécie, enquanto os outros oito foram detecções exclusivamente acústicas. Ao todo, 9.115 cliques foram extraídos (**Tabela 6.1**). A maior parte dos cliques (cerca de 80%) foi extraída de três eventos, sendo que um deles foi subamostrado para limitar o total a pouco mais

de 3.000 cliques, evitando que dominasse as análises. O detector identificou e classificou cadeias de cliques de ecolocalização consistentes com as características da espécie. Frequentemente, essas cadeias foram detectadas com intervalos e ângulos de direção regulares, que permitiam inclusive estimativas do número de indivíduos. Um exemplo de clique do cachalote é apresentado na **Figura 6.2(a)** (forma de onda e espectrograma). A forma de onda apresenta poucas oscilações e os espectrogramas mostram energia em frequências entre cerca de 5 e 40 kHz. A frequência de pico média foi de 13,94 kHz ( $\pm 12,4$ ), com mediana de 13,67 kHz (min - max.: 11,7 - 79,1). Os principais parâmetros dos cliques estão sumarizados na **Tabela 6.2**. A Figura 6.3(a) apresenta o espectro médio dos cliques analisados; a Figura 6.3(b), o histograma da distribuição da frequência de pico; a Figura 6.3(c), o espectrograma concatenado dos cliques e a Figura 6.3(d) o histograma do intervalo-entre-cliques.

A média do intervalo-entre-cliques ( $n = 5.759$ ) foi de 0,78 s ( $\pm 0,45$ ), com mediana de 0,64 s (mín - máx.: 0,2 - 1,99 s). Os cliques analisados apresentam características semelhantes às descritas na literatura. Os resultados estão alinhados com os sons de ecolocalização do cachalote, conhecidos como cliques “usuais”, que são emitidos com intervalos típicos entre 0,5 e 2,0 s e possuem um pico de frequência em torno de 15 kHz (MOHL et al., 2003). A **Figura 6.4** ilustra um mapa da região com a distribuição dos eventos acústicos analisados. Os eventos se concentraram na região do talude continental e em áreas oceânicas adjacentes. A profundidade local média destes eventos acústicos foi de 1.730 m ( $\pm 716$ ).



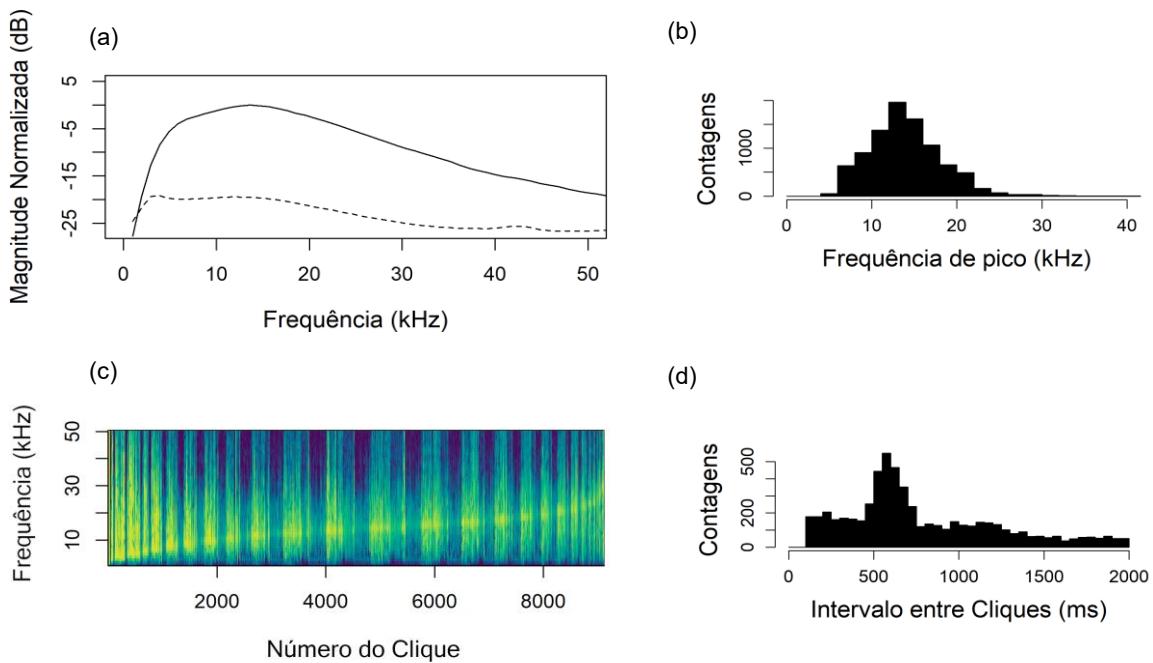
**Figura 6.2** - Exemplos de cliques de ecolocalização das três famílias de cetáceos odontocetos analisadas, ilustrando a forma da onda (figura da esquerda) e o espectrograma (figura da direita) (128-pt FFT, 500 kHz, Hann, 75% sobreposição) (a): Physeteridae, família composta por uma única espécie, o cachalote (*Physeter macrocephalus*), (b): Kogiidae, composta por duas espécies do gênero *Kogia*, no exemplo representada pelo cachalote-anão (*Kogia sima*) e (c): Ziphiidae, família composta por uma diversidade de espécies de baleias-bicudas (zifídeos).

**Tabela 6.1** - Sumário de eventos acústicos atribuídos ao cachalote (*Physeter macrocephalus*). Os eventos listados representam grupos detectados por meio de cliques durante as atividades de campo do PMC-BS\Petrobras. As colunas apresentam a data, profundidade no local da detecção, número de cliques analisados e a presença ou ausência de avistagem visual associada ao evento acústico.

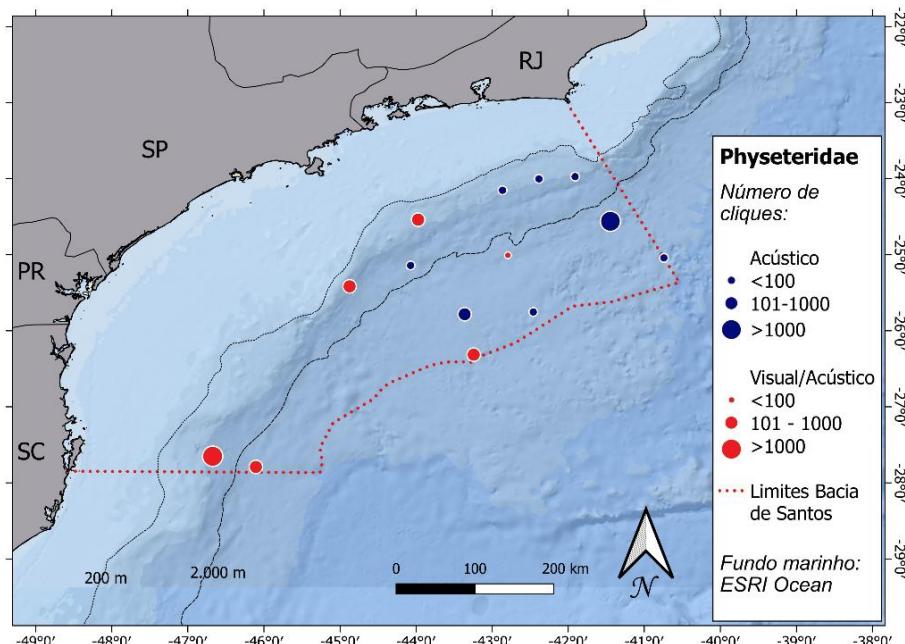
Evento Acústico	Data	Profundidade (m)	Número de cliques	Avistagem
PMC_1_A2	28/11/2015	1.241	2.835	Sim
PMC_1_A11	03/12/2015	1.843	3.006	Sim
PMC_1_A35	14/12/2015	2.973	45	Não
PMC_1_A61	23/12/2015	1.901	55	Não
PMC_2_A6	12/05/2016	2.270	408	Sim
PMC_2_A63	07/06/2016	2.118	716	Não
PMC_4_A73	07/04/2017	9.26	199	Sim
PMC_5_A45	06/09/2017	722	260	Sim
PMC_9_A109	25/09/2019	1.042	6	Não
PMC_10_A49	17/03/2020	2.301	59	Não
PMC_10_A59	22/03/2020	2.430	1.243	Não
PMC_10C_A30	06/11/2020	2.310	158	Sim
PMC_15_A114	28/09/2022	2.133	46	Sim
PMC_16_A36	29/01/2023	921	8	Não
PMC_17_A55	15/09/2023	832	71	Não
<b>Total</b>			<b>9.115</b>	

**Tabela 6.2** - Sumário estatístico dos parâmetros acústicos dos cliques do cachalote (*Physeter macrocephalus*). O intervalo-entre-cliques tem n = 5.759, enquanto os demais parâmetros possuem n = 9.115. P10: percentil 10%; P90: percentil 90%.

Parâmetro acústico	Média (DP)	Mediana (Min – Max)	P10 - P90
Frequência de pico (kHz)	13,9 ( $\pm$ 4,3)	13,7 (5 - 42)	8,8 - 19,5
Largura banda -3 dB (kHz)	3,5 ( $\pm$ 2,3)	2,8 (0,4 - 20)	1,3 - 6,6
Largura banda -10 dB (kHz)	11,1 ( $\pm$ 5,9)	10,3 (1 - 41)	3,9- 19,5
Fator Q -3 dB	5,5 ( $\pm$ 3,9)	4,5 (0,7 - 50)	1,9 - 10,3
Fator Q -10 dB	1,7 ( $\pm$ 1,3)	1,2 (0,2 - 15)	0,7 - 3,2
Duração (μs)	162 ( $\pm$ 230)	62 (2 - 1940)	10 - 520
Intervalo-entre-cliques (ms)	781 ( $\pm$ 450)	645 (100 - 2000)	254 - 1469



**Figura 6.3** - Características dos cliques do cachalote (*Physeter macrocephalus*): (a) espectro médio do conjunto de cliques analisado (linha sólida); a linha pontilhada mostra o ruído médio, calculado a partir de uma amostra anterior a cada clique (512-pt FFT, 500 kHz, Hann) (b) histograma da frequência de pico, (c) espectrograma concatenado dos cliques em ordem crescente do valor de pico de frequência (512-pt FFT, 500 kHz, Hann, sem sobreposição) e (d) histograma do intervalo-entre-cliques.



**Figura 6.4** - Mapa da Bacia de Santos com a distribuição dos eventos acústicos atribuídos ao cachalote (*Physeter macrocephalus*). As cores na legenda indicam se houve ou não avistagem (Visual/Acústico ou Acústico), conforme a legenda. O tamanho dos pontos é proporcional ao número de cliques detectados por evento. As linhas batimétricas de 200 m e 2.000 m estão assinaladas no mapa.

### 6.2.2 Família Kogiidae

Foram processados 15 eventos acústicos de cliques de ecolocalização do tipo NBHF atribuídos aos kogídeo (**Tabela 6.3**). Em apenas duas ocasiões os eventos acústicos foram acompanhados de confirmação visual da espécie; sendo que um evento foi confirmado visualmente como do gênero *Kogia* e os demais 12 eventos foram detecções exclusivamente acústicas. Os cliques de *Kogia* possuem características bastante particulares, sendo classificados como do tipo NBHF (do inglês “narrow-band high-frequency”), com frequência de pico superior a 100 kHz, concentrada em uma faixa estreita do espectro (MADSEN et al., 2005). No geral, os eventos foram de poucas cadeias de cliques por curtos períodos, geralmente quando os animais se encontravam em ângulos próximos a 90 graus (perpendiculares ao arranjo de hidrofones), o que corresponde ao ponto de menor distância entre o animal emissor e os hidrofones. Nos dois eventos acústicos em que houve a confirmação visual (ver **Tabela 6.3**), a embarcação reduziu a velocidade, o que permitiu que as gravações fossem feitas por um período maior. Nesses dois casos foi detectada uma quantidade consideravelmente maior de cliques e a equipe visual confirmou a identificação da espécie como o cachalote-anão (*Kogia sima*). Devido à redução da velocidade, o arranjo de hidrofones deixou a posição de arrasto (20 - 30 m) e passou a afundar, alcançando profundidades maiores (até 75 m). Embora os ângulos de direção tenham sido invalidados, diversas cadeias de cliques foram detectadas, e o classificador foi capaz de identificar corretamente os cliques NBHF de *Kogia*.

Um exemplo de clique do cachalote-anão (forma de onda e espectrograma) está ilustrado na **Figuras 6.2(b)**. A forma de onda mostra que o clique apresenta muitas oscilações, com múltiplas passagens por zero, e uma duração mais longa em comparação ao clique do cachalote. A energia do clique está concentrada em bandas acima de 100 kHz. Os dois eventos confirmados como cachalote-anão ( $n = 2.705$  cliques) foram analisados separadamente dos demais (**Tabela 6.4**). A frequência de pico média dos cliques foi de 124,06 kHz ( $\pm 1,8$ ), com mediana de 124,02 kHz, variando de 118 a 156 kHz . A Figura 6.5(a) apresenta o espectro médio dos cliques analisados, onde é possível observar um pico acentuado em torno de 124 kHz. Um segundo pico, menos pronunciado, também pode ser identificado próximo a 150 kHz. Na Figura 6.5(b), o histograma da frequência de pico, e na Figura 6.5(c), o espectrograma concatenado ( $n = 2.705$  cliques), reforçam esse padrão, destacando a

ausência de energia significativa abaixo de 100 kHz. A Figura 6.5(d) apresenta o histograma do intervalo-entre-cliques ( $n = 2.434$ ), com uma média de 156 ms ( $\pm 75$ ) e mediana de 146 ms (8 a 498). Um sumário dos principais parâmetros acústicos observados está na Tabela 6.4. Os valores estão dentro dos intervalos descritos na literatura para os cliques do cachalote-anão (*Kogia sima*) (MERKENS et al., 2018; GRIFFITHS et al., 2020; MALINKA et al., 2021).

Os outros 13 eventos com cliques NBHF ( $n = 1.178$  cliques) não tiveram confirmação visual. Houve uma única exceção de um evento acústico acompanhado de uma avistagem de *Kogia* (classificado no nível de gênero, sem a identificação da espécie). Esses eventos foram, portanto, classificados e analisados como *Kogia* spp., uma vez que não foi possível determinar a espécie. Foram observados cliques muito semelhantes àqueles registrados nos eventos de *K.sima*. A média da frequência de pico dos foi ligeiramente superior à observada para *K.sima* com uma média de 126,51 kHz ( $\pm 1,7$ ) e mediana de 126,95 kHz (113 e 131). A **Figura 6.5(a)** mostra que o espectro médio dos eventos de *Kogia* spp. (linha vermelha) apresentou um padrão similar ao de *K.sima* (linha preta), com um pico principal acentuado e um pico secundário menos proeminente. Nota-se, na mesma figura, que as curvas são bastante semelhantes, com a diferença de que *Kogia* spp. apresenta um leve deslocamento do pico principal (uma frequência de pico ligeiramente maior) em comparação ao espectro de *K.sima*. O intervalo-entre-cliques foi mais longo nos eventos de *Kogia* spp., com média de 177 ms ( $\pm 81$ ) e mediana de 162 ms, variando de 39 a 497 ms. A possibilidade de ocorrência de outras espécies que produzem cliques com características acústicas semelhantes às do gênero *Kogia* (NBHF) é abordada na discussão.

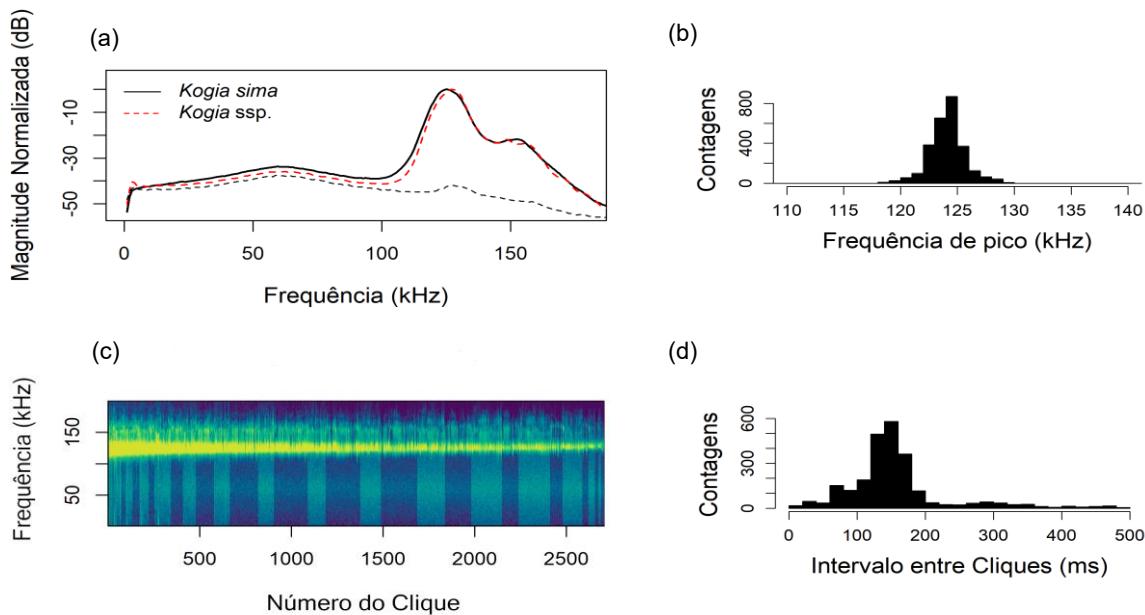
O mapa da Figura 6.6 mostra a distribuição dos eventos acústicos analisados, incluindo os dois confirmados visualmente como de *K.sima*. Os registros se concentraram na região do talude e área oceânica adjacente. A profundidade local média foi de 1.897 m ( $\pm 614$ ).

**Tabela 6.3** - Sumário de eventos acústicos atribuídos a kogídeos (família Kogiidae). Os eventos listados representam grupos detectados por meio de cliques durante as atividades de campo do PMC-BS\PETROBRAS. As colunas apresentam a data, profundidade no local da detecção, número de cliques analisados e a presença ou ausência de avistagem associada ao evento acústico. Os eventos assinalados com (\*) na tabela correspondem a registros com confirmação visual de cachalote-anão (*Kogia sima*), enquanto os demais foram classificados como *Kogia* spp.

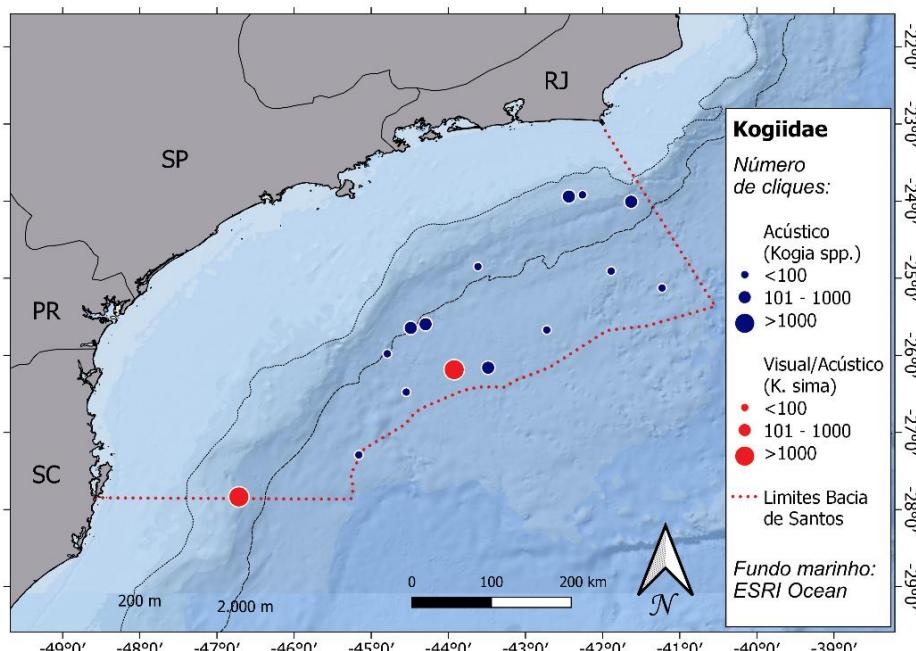
Evento Acústico	Data	Profundidade (m)	Número de cliques	Avistagem
PMC_1_AP7	18/12/2015	2.335	88	Não
PMC_2_AP5	15/06/2016	2.595	66	Não
PMC_3_A28	04/10/2016	2.037	64	Não
PMC_3_A40	05/10/2016	1.984	280	Não
PMC_3_A75	14/10/2016	1.381	115	Não
PMC_5_A29	02/09/2017	1.934	157	Não
PMC_5_A93	18/09/2017	2.640	5	Não
PMC_5_A106	23/09/2017	1.654	28	Não
PMC_7_A99	07/10/2018	2.217	140	Não
PMC_9_A145*	05/10/2019	2.281	1.322	Sim
PMC_10C_A5	31/10/2020	751	107	Não
PMC_12_A118*	24/02/2021	1.159	1.383	Sim
PMC_14_A17	01/02/2022	2.461	38	Não
PMC_16_A29	26/01/2023	2.210	45	Sim
PMC_16_A39	02/02/2023	812	45	Não
<b>Total</b>			<b>3.833</b>	

**Tabela 6.4** - Sumário estatístico dos parâmetros acústicos dos cliques do cachalote-anão (*Kogia sima*). O intervalo-entre-cliques tem n = 2.434, enquanto os demais parâmetros possuem n = 2.705. P10: percentil 10%; P90: percentil 90%.

Parâmetro acústico	Média (DP)	Mediana (Min – Max)	P10 - P90
Frequência de pico (kHz)	124,0 ( $\pm$ 1,8)	124,0 (118 - 156)	122,0 - 126,0
Largura banda -3 dB (kHz)	7,5 ( $\pm$ 2,5)	7,3 (0,5 - 18)	4,8 - 10,9
Largura banda -10 dB (kHz)	13,8 ( $\pm$ 3,5)	13,5 (5 - 42)	9,6 - 18,4
Fator Q -3 dB	19,5 ( $\pm$ 14,3)	16,9 (7 - 247)	11,3 - 26,3
Fator Q -10 dB	9,6 ( $\pm$ 14,3)	9,1 (3 - 27)	6,7 - 13,0
Duração (μs)	286 ( $\pm$ 319)	210 (8 - 1997)	132 - 338
Intervalo-entre-cliques (ms)	157 ( $\pm$ 75)	146 (8 - 498)	79 - 256



**Figura 6.5** - Características dos cliques do cachalote-anão (*Kogia sima*): (a) espectro médio do conjunto de cliques analisado (linha sólida); a linha pontilhada mostra o ruído médio, calculado a partir de uma amostra anterior a cada clique (512-pt FFT, 500 kHz, Hann). A linha pontilhada em vermelho corresponde ao espectro médio dos eventos acústicos de *Kogia* spp. analisados separadamente, (b) histograma da frequência de pico de, (e) espectrograma concatenado dos cliques analisados em ordem crescente do valor de pico de frequência (512-pt FFT, 500 kHz, Hann, sem sobreposição) e (f) histograma do intervalo-entre-cliques.



**Figura 6.6** - Mapa da Bacia de Santos com a distribuição dos eventos acústicos atribuídos ao gênero *Kogia*. Dois eventos foram confirmados visualmente como do cachalote-anão (*Kogia sima*), conforme indicado na legenda. Os demais eventidos identificados como *Kogia* spp. não tiveram confirmação visual, com exceção de um registro visual confirmado apenas como *Kogia*, sem identificação da espécie, e, por isso, agrupado em *Kogia* spp. O tamanho dos pontos é proporcional ao número de cliques detectados por evento. As linhas batimétricas de 200 m e 2.000 m estão assinaladas no mapa.

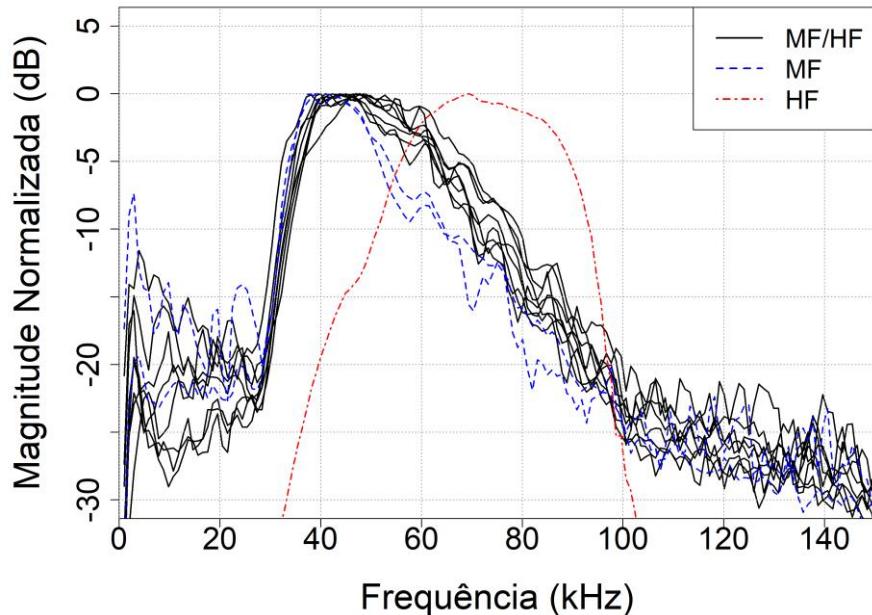
### 6.2.3 Família Ziphiidae

Foram no total 11 eventos acústicos de zifídeos analisados. O “Click Train Detector” não foi empregado no caso dos zifídeos, pois foram poucos cliques detectados nos eventos acústicos, em número insuficiente para que o algoritmo pudesse reconhecer padrões de cadeias de cliques. Um exemplo da forma de onda e do espectrograma de um clique de zifídeo pode ser observado na **Figura 6.2(c)**. A forma de onda apresenta um pulso oscilatório característico, semelhante a uma bolha, enquanto o espectrograma mostra a modulação ascendente da frequência, típica de cliques FM que caracteriza os cliques deste grupo. De modo geral, apenas algumas dezenas de cliques foram registrados por evento, totalizando 185 cliques nos 11 eventos analisados (**Tabela 6.5**). Esse número reduzido pode estar associado às características da plataforma de coleta, bem como ao comportamento elusivo desses animais. Como diversas espécies de zifídeos são potenciais fontes dos cliques registrados, optou-se por analisar cada evento individualmente, considerando a possibilidade de múltiplas espécies estarem presentes. Essa abordagem, por outro lado, limitou o poder estatístico para a identificação das espécies, uma vez que o número de amostras por evento é bastante reduzido. A primeira tentativa de distinguir diferentes tipos de cliques entre os eventos foi realizada durante o processo automático de detecção e classificação no PAMGuard, para distinguir cliques de zifídeos entre as bandas de frequência MF (25 - 50 kHz) e HF (40 - 80 kHz). Ambos os tipos de cliques foram detectados na maioria dos eventos, embora em alguns casos tenham sido observados apenas cliques MF ou apenas HF (ver última coluna da **Tabela 6.5**).

**Tabela 6.5** - Sumário de eventos acústicos atribuídos a zifídeos (família Ziphiidae). Os eventos listados representam grupos detectados por meio de cliques durante as atividades de campo do PMC-BB/PETROBRAS. As colunas apresentam a data, a profundidade no local da detecção e o número de cliques analisados. Todos os registros foram exclusivamente acústicos, ou seja, sem observação ou identificação visual da espécie. A última coluna indica os tipos de cliques detectados em cada evento, classificados conforme o detector de cliques do PAMGuard, configurado para duas bandas de teste: 25-50 kHz (tipo MF) e 40-80 kHz (tipo HF). Na maioria dos eventos foram detectados cliques de ambos os tipos (MF/HF).

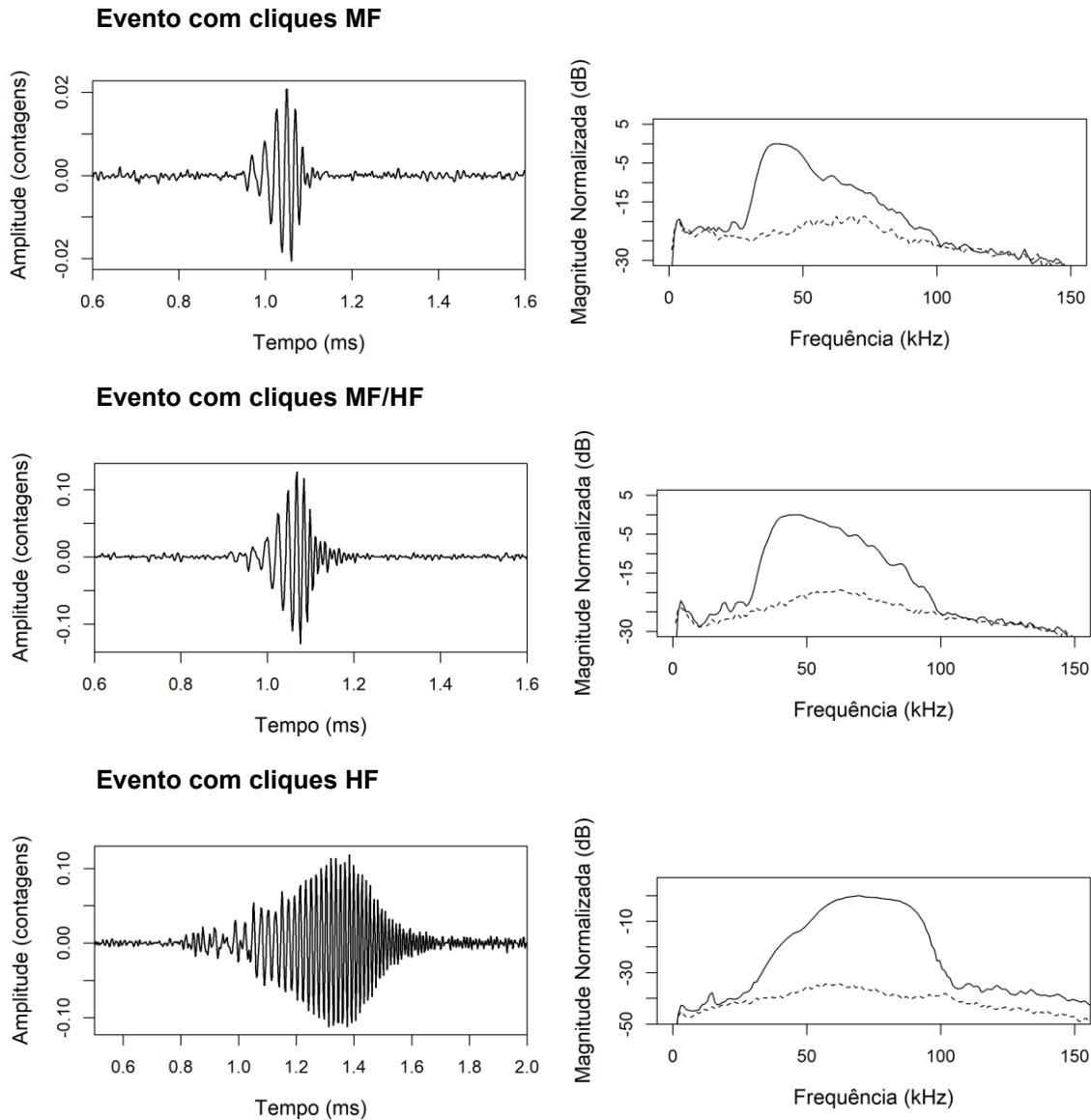
Evento Acústico	Data	Profundidade (m)	Número de cliques	Tipo de Clique
PMC_4_A45	22/03/2017	1.095	6	MF/HF
PMC_5_A10	28/08/2017	1.910	20	MF
PMC_5_A11	28/08/2017	1.688	19	MF/HF
PMC_5_A47	06/09/2017	2.096	18	MF/HF
PMC_7_A26	10/09/2018	2.040	11	MF/HF
PMC_8_A27	21/03/2019	1.952	3	MF
PMC_9_A163	12/10/2019	1.572	5	MF/HF
PMC_11_A52	06/09/2020	2.003	45	MF/HF
PMC_11_A54	06/09/2020	417	42	HF
PMC_11_A62	09/09/2020	1.552	8	MF/HF
PMC_16_A56	13/02/2023	2.177	8	MF/HF
Total			185	

A **Figura 6.7** apresenta o espectro médio de todos os eventos acústicos de zifídeos analisados, agrupados em três categorias: eventos com cliques do tipo MF, tipo HF e aqueles com cliques de ambos os tipos (MF/HF). Observa-se que os cliques classificados como MF/HF, que foram a maioria dos eventos, apresentam um padrão semelhante na distribuição de energia ao longo do espectro (linha preta na Figura 6.7). Os cliques do tipo MF (linha azul) apresentam um pico de frequência levemente deslocado para valores mais baixos e uma queda mais acentuada da energia a partir de 50 kHz. Em contraste, no único evento classificado exclusivamente como do tipo HF (linha vermelha), destaca-se um pico de frequência consideravelmente mais alto (acima de 60 kHz), com um decaimento energético mais abrupto nas frequências superiores, evidenciando um padrão espectral distinto em relação às demais categorias.

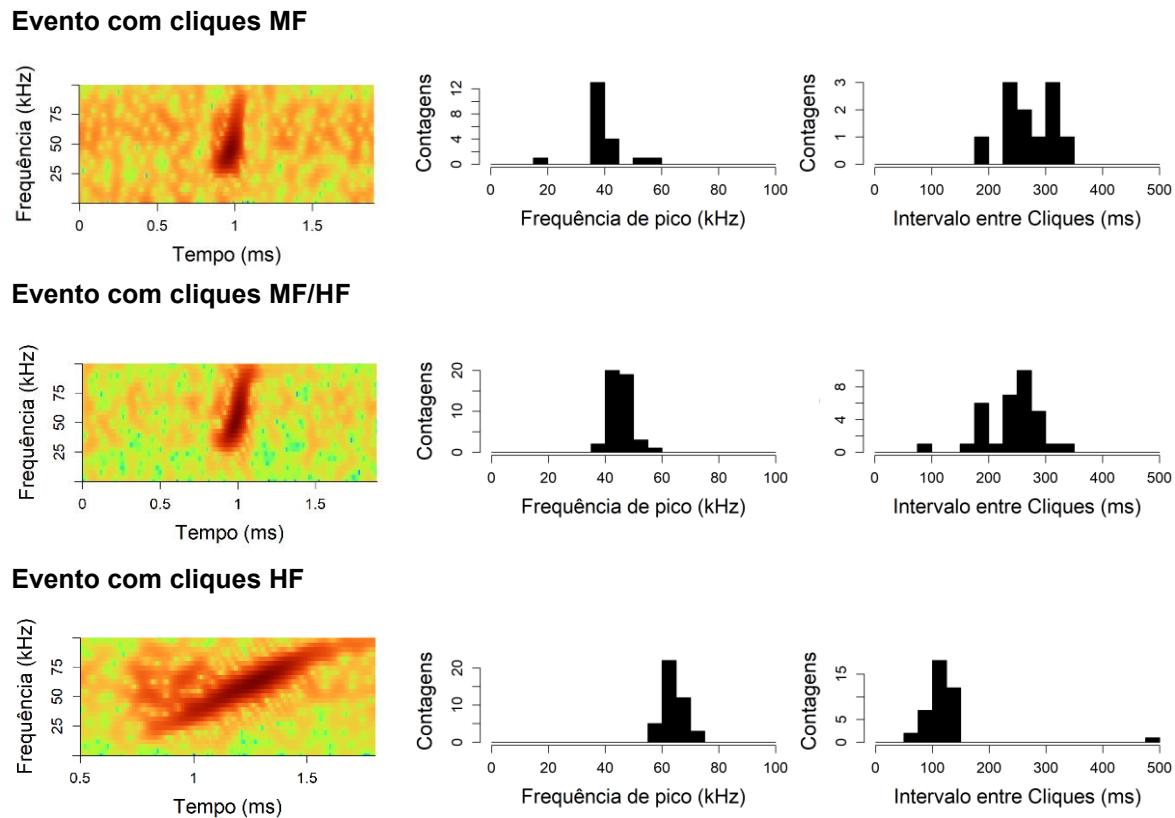


**Figura 6.7** - Espectro médio de 11 eventos acústicos independentes de cliques de zifídeos (512-pt FFT, 500 kHz, Hann). Na legenda as cores indicam o tipo de evento acústico, de acordo com a classificação dos cliques de cada evento. Os tipos foram rotulados de acordo com a classificação do detector de cliques no PAMGuard, configurado para uma banda de teste entre 25-50 KHz (tipo MF) e uma outra entre 40-80 kHz (tipo HF). A sigla MF/HF indica que cliques de ambos os tipos foram detectados no evento.

Para uma análise mais detalhada, foram selecionados três eventos representativos (um de cada categoria MF, HF e MF/HF), priorizando aqueles com maior número de cliques detectados por evento. Os eventos escolhidos foram: PMC\_5\_A10 (20 cliques do tipo MF), PMC\_11\_A52 (42 cliques de ambos os tipos, MF/HF) e PMC\_11\_A54 (45 cliques do tipo HF) (Tabela 6.5). O espectro médio dos cliques de cada um desses eventos (MF, MF/HF e HF) foi analisado (**Figura 6.8**), assim como os histogramas da frequência de pico (kHz) e do intervalo-entre-cliques (ms) (**Figura 6.9**).



**Figura 6.8** - Características dos cliques de três eventos acústicos de zifídeos registrados na Bacia de Santos. À esquerda, a forma de onda de um clique individual representativo de cada evento; à direita, o espectro médio do conjunto de cliques (512-pt FFT, 500 kHz, Hann). A linha pontilhada mostra o espectro médio do ruído de uma amostra anterior a cada clique. Os eventos foram selecionados por representarem os diferentes tipos de cliques observados. Os tipos foram rotulados conforme a classificação atribuída pelo detector de cliques do PAMGuard, configurado com duas bandas de frequência: 25-50 kHz (tipo MF) e 40-80 kHz (tipo HF). A sigla MF/HF indica a detecção de cliques dos dois tipos em um mesmo evento.



**Figura 6.9** - Características dos cliques de três eventos acústicos de zifídeos registrados na Bacia de Santos. No lado esquerdo: spectrograma de um clique individual (128-pt FFT, 500 kHz, Hann, 75% sobreposição), figura no centro: histograma da frequência de pico e à direita: histograma do intervalo-entre-cliques. Os eventos analisados foram selecionados para representar os tipos de cliques encontrados. Os tipos foram rotulados de acordo com a classificação do detector de cliques no PAMGuard, configurado para uma banda de teste entre 25-50 kHz (tipo MF) e uma outra entre 40-80 kHz (tipo HF). A sigla MF/HF indica que cliques de ambos os tipos foram detectados no mesmo evento.

Os resultados apontam diferenças entre os cliques dos eventos classificados como MF, MF/HF e HF, sendo que os cliques do tipo HF apresentaram a frequência de pico média mais elevada e a duração mais longa (Tabela 6.6). A mediana da frequência foi de 63,5 kHz, em contraste com 45,4 kHz nos cliques MF/HF e 38,8 kHz nos cliques do tipo MF. Além disso, o intervalo-entre-cliques do evento HF foi o menor entre os três tipos, com mediana de 121 ms, comparado a 252 ms no evento MF/HF e 271 ms no evento MF (Tabela 6.6). Os cliques que caracterizaram o evento HF foram registrados em apenas um dos 11 eventos analisados.

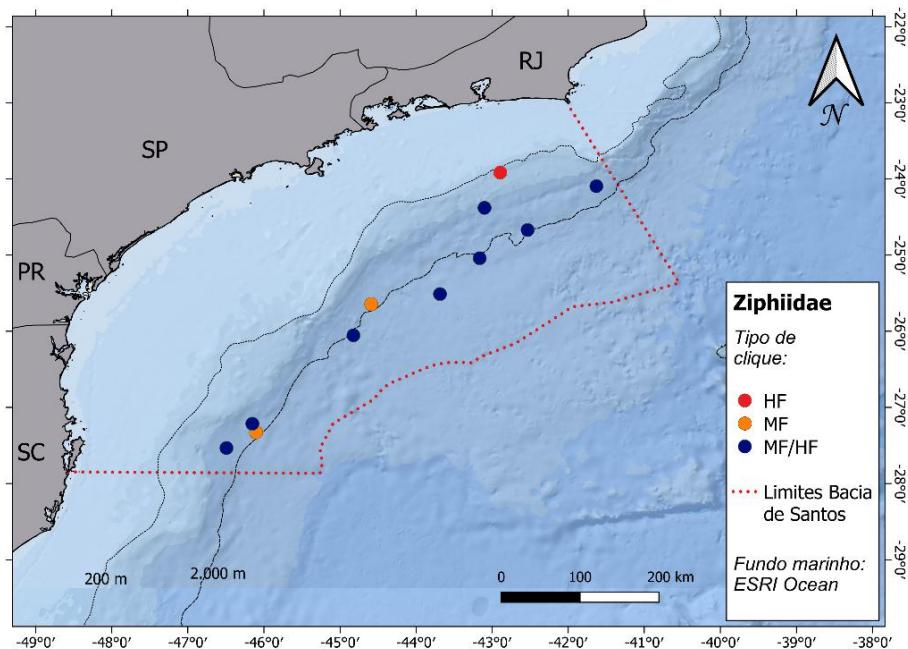
**Tabela 6.6** - Sumário estatístico dos parâmetros acústicos dos cliques de zifídeos (Família *Ziphiidae*), apresentando a mediana, com os percentis de 10% e 90% indicados entre parênteses. São apresentados três eventos acústicos analisados de forma independente. Cada evento acústico está representado pelos tipos de cliques encontradas (MF, MF/HF e HF). Os tipos foram rotulados de acordo com a classificação do detector de cliques no PAMGuard, configurado para uma banda de teste entre 25-50 KHz (tipo MF) e uma outra entre 40-80 kHz (tipo HF). Na categoria MF/HF ambos os tipos foram encontrados no mesmo evento acústico. O n representa o número de amostras, com exceção do Intervalo-entre-cliques em que o n foi MF = 11, MF/HF = 33 e HF = 40).

Parâmetro acústico	Evento Acústico		
	MF (n = 20)	MF/HF (n = 42)	HF (n= 46)
Frequência de pico (kHz)	38,8 (35,6 - 42,7)	45,4 (41,5 - 48,9)	63,5 (59,6 - 68,8)
Largura banda -3 dB (kHz)	4,7 (1,2 - 10,3)	7,9 (2,6 - 17,6)	5,3 (1,5 - 12,3)
Largura banda -10 dB (kHz)	17,7 (13,6 - 23,7)	31,5 (20,8 - 42,6)	38,8 (30,4 - 47,7)
Fator Q -3 dB	8,0 (3,7 - 31,2)	5,8 (2,6 - 19,3)	12,1 (5,9 - 44,3)
Fator Q -10 dB	2,12 (1,6 - 2,9)	1,5 (1,1 - 2,0)	1,7 (1,4 - 2,1)
Duração (μs)	46 (12 - 98)	56 (32 - 104)	648 (359 - 842)
Intervalo-entre-cliques (ms)	271 (238- 313)	252 (178- 287)	121 (76 - 127)

Os eventos classificados como MF e MF/HF também apresentaram diferenças entre si, principalmente em relação à frequência de pico dos cliques. A ocorrência de eventos com ambos os tipos de cliques (MF/HF) se deu pela sobreposição parcial das faixas de frequência dos classificadores MF e HF configurados no PAMGuard (sobreposição na faixa entre 40 e 50 kHz). Nos cliques dos eventos MF, a maioria dos valores de frequência de pico ficou abaixo de 40 kHz (mediana: 38,8 kHz), enquanto nos eventos MF/HF predominaram cliques com frequência de pico acima de 40 kHz (mediana: 45,4 kHz). Embora o formato geral do espectro seja semelhante, o espectro médio do evento MF apresentou um decaimento mais acentuado após o pico, em comparação ao evento MF/HF (**Figura 6.7**). O intervalo-entre-cliques também diferiu, sendo ligeiramente maior no evento MF (mediana: 271 ms) do que no evento MF/HF (mediana: 252 ms) (**Tabela 6.6**). Essas diferenças podem refletir características acústicas de duas espécies distintas de baleias-bicudas, porém o reduzido número de amostras limita conclusões mais robustas, especialmente para os cliques MF. Além do evento MF analisado (n = 20), apenas um outro evento foi classificado como MF, com somente três cliques detectados, o que inviabiliza uma análise detalhada. Todos os demais eventos foram classificados como MF/HF (n = 8) e apresentaram

características acústicas semelhantes, possivelmente representando uma mesma espécie. No entanto, a maioria desses eventos também apresentou um baixo número de cliques, o que limita a possibilidade de generalizações mais consistentes (**Tabela 6.5**). As diferenças marcantes entre os cliques do evento HF em relação aos demais sugerem a presença de, no mínimo, duas espécies distintas de zifídeos nos dados analisados. Considerando ainda as variações observadas entre os eventos MF e MF/HF, é possível que até três espécies distintas estejam representadas. Na discussão, propõe-se uma tentativa de classificação das espécies, fundamentada nas características dos cliques observados, comparações com descrições disponíveis na literatura e na distribuição geográfica conhecida das baleias-bicudas no Atlântico Sul Ocidental.

No mapa (**Figura 6.10**), a distribuição dos eventos acústicos de zifídeos detectados, classificados como MF, MF/HF ou HF, indica que os registros se concentram na região do talude, com profundidade média local de 1.690 m ( $\pm 515$ ).



**Figura 6.10** - Mapa da Bacia de Santos com a distribuição dos eventos acústicos registrados para baleias-bicudas (família Ziphiidae). Nenhum desses registros teve confirmação visual. Cada evento é representado pelos tipos de cliques detectados (MF, MF/HF e HF), conforme a legenda. A classificação dos tipos foi baseada nos resultados do detector de cliques do PAMGuard, configurado para bandas de teste entre 25-50 kHz (tipo MF) e 40-80 kHz (tipo HF). As linhas batimétricas de 200 m e 2.000 m estão assinaladas no mapa.

#### 6.2.4 Família Pontoporiidae

Foram detectados poucos eventos acústicos atribuídos à toninha (*Pontoporia blainvilliei*). Assim como no caso dos zifídeos, o número de cliques detectados foi reduzido, e foi utilizado o detector de cliques do PAMGuard sem o algoritmo “Click Train Detector”. A toninha é uma espécie costeira que produz cliques de ecolocalização que se enquadram no tipo NBHF (MELCÓN; FAILLA; IÑÍGUEZ, 2012), também encontrado em outros grupos, como os kogídeos descritos anteriormente (GALATIUS et al., 2019). Foram registradas três ocorrências de cliques NBHF nas águas costeiras da Bacia de Santos (**Tabela 6.7**). Observa-se que, em um dos eventos, o número de cliques detectados foi zero. Isso ocorreu porque os cliques presentes neste evento não ultrapassaram o limiar de detecção pré-definido (16 dB), embora a presença de cliques NBHF tenha sido em campo, assim como na validação manual dos dados feita posteriormente. A metodologia empregada impôs dificuldades para a amostragem acústica das áreas costeiras. A partir de 40m de profundidade o arranjo de hidrofones foi arrastado com um lançamento de cabo mais curto e mais raso (150m da popa e com o hidrofone a cerca de 8 a 12 m de profundidade). Essa configuração aumentou significativamente a captação de ruídos, especialmente aqueles provenientes da superfície e da cavitação gerada pela embarcação.

Ao todo, foram analisados 58 cliques analisados (**Tabela 6.7**). Dado o número reduzido de cliques, os resultados aqui apresentados devem ser considerados preliminares. Um exemplo representativo dos cliques inclui a forma de onda e o espectrograma de uma amostra individual, bem como o espectro médio e o histograma da frequência de pico, intervalo-entre-cliques e o espectrograma concatenado dos 58 cliques (**Figura 6.11a-f**). Os resultados demonstram que os cliques possuem bandas de energia estreita acima de 100 kHz, compatíveis com o padrão dos cliques do tipo NBHF. A frequência de pico média foi de 130,5 kHz ( $\pm 6,4$ ), com mediana de 131,3 kHz e intervalo variando entre 104 e 138 kHz. A média do intervalo-entre-cliques ( $n = 24$ ) foi de 30 ms ( $\pm 14$ ) e mediana de 30 ms (3-56) (**Tabela 6.8**). A discussão aborda a classificação da espécie em comparação com outras que apresentam cliques de ecolocalização com características acústicas similares.

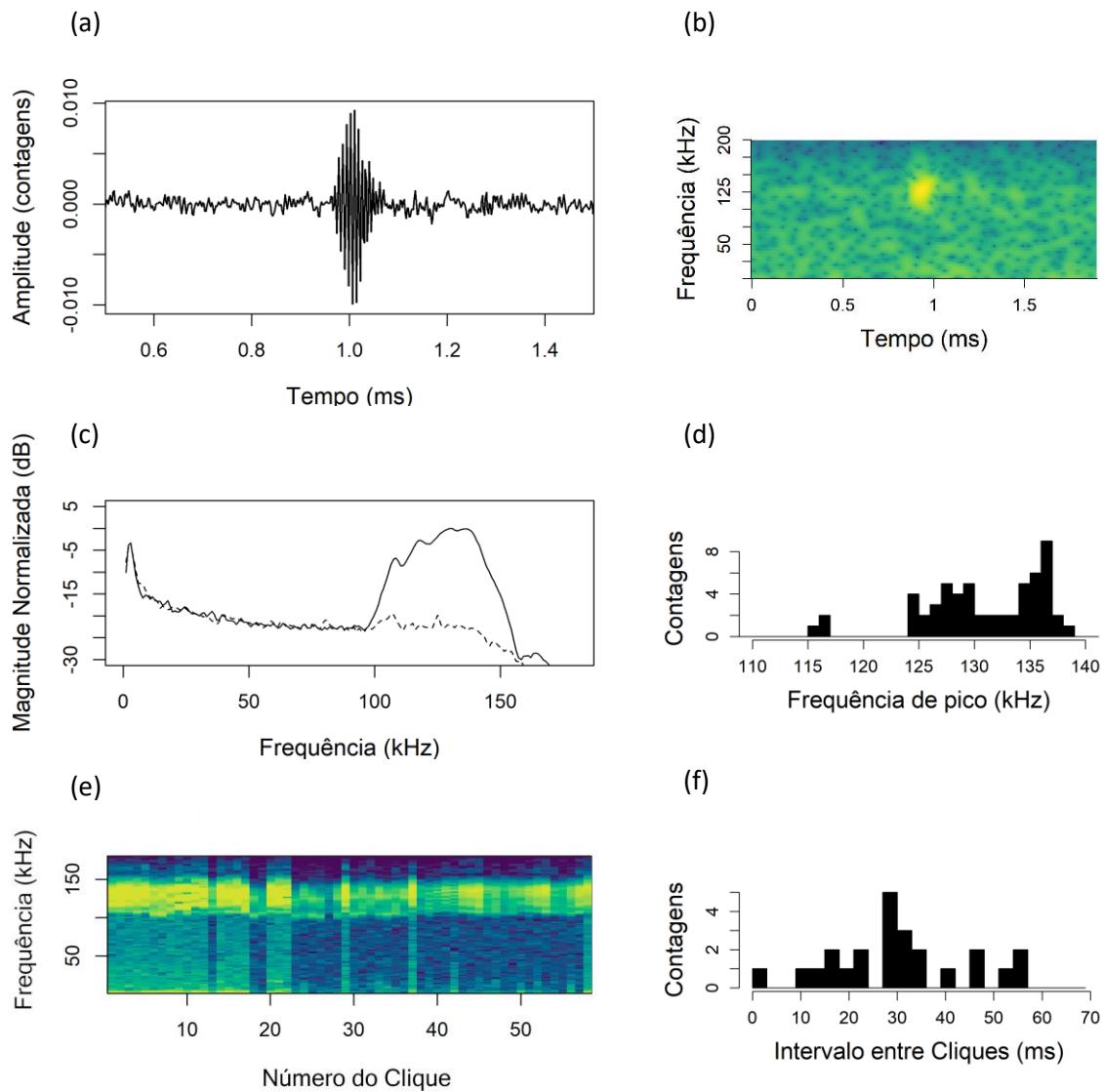
No mapa (**Figura 6.12**) a distribuição as detecções de cliques atribuídas à toninha se concentraram na região costeira com profundidades inferiores a 50 m. A profundidade média foi de 29 m ( $\pm 14$ ), incluindo o evento sem cliques analisados.

**Tabela 6.7** - Sumário de eventos acústicos atribuídos a toninha (*Pontoporia blainvilliei*). Os eventos listados representam grupos detectados por meio de cliques durante as atividades de campo do PMC-BSPetrobras. As colunas indicam a data, a profundidade no local da detecção e o número de cliques analisados. Todos os eventos foram exclusivamente acústicos, ou seja, não houve observação ou identificação visual da espécie. O evento assinalado com (\*) refere-se a um registro em que os cliques foram detectados em campo, porém ficaram abaixo do limiar de detecção (16 dB) definido na análise.

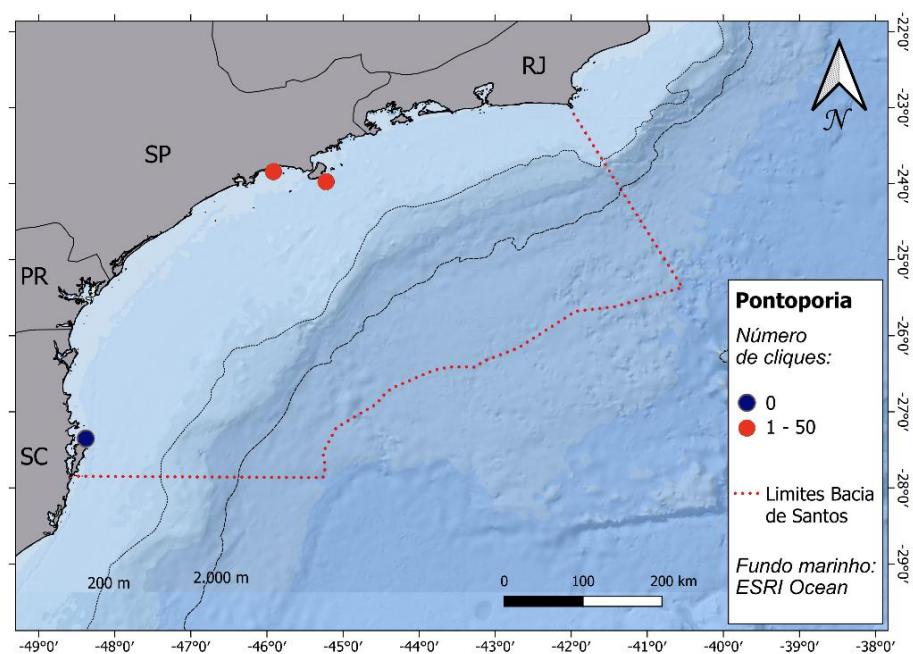
Evento Acústico	Data	Profundidade (m)	Número de cliques
PMC_1_AP2	05/12/2015	18	36
PMC_4_A96*	18/04/2017	25	0
PMC_17_A51	10/09/2023	45	22
<b>Total</b>			<b>58</b>

**Tabela 6.8** - Sumário estatístico dos parâmetros acústicos dos cliques da toninha (*Pontoporia blainvilliei*). O intervalo-entre-cliques tem n = 24, enquanto os demais parâmetros possuem n = 58. P10: percentil 10%; P90: percentil 90%.

Parâmetro acústico	Média (DP)	Mediana (Min – Max)	P10 - P90
Frequência de pico (kHz)	130,5 ( $\pm$ 6,4)	131,3 (105 - 139)	125,0 - 136,7
Largura banda -3 dB (kHz)	7,3 ( $\pm$ 4,8)	7,0 (0,8 - 16,4)	1,3 - 14,0
Largura banda -10 dB (kHz)	23,5 ( $\pm$ 10,4)	24,5 (4 - 40)	8,1 - 37,1
Fator Q -3 dB	36,7 ( $\pm$ 37,5)	18,9 (8 - 148)	9,6 - 102,5
Fator Q -10 dB	7,7 ( $\pm$ 5,5)	5,3 (3 - 29)	3,6 - 16,2
Duração (μs)	219 ( $\pm$ 284)	75 (30 - 1059)	42 - 610
Intervalo-entre-cliques (ms)	30 ( $\pm$ 14)	30 (3 - 56)	14 - 51



**Figura 6.11** - Características dos cliques da toninha (*Pontoporia blainvillie*) na Bacia de Santos: (a) exemplo da forma da onda e (b) espectrograma de um clique (128-pt FFT, 500 kHz, Hann, 75% sobreposição), (c) espectro médio do conjunto de cliques analisados (linha sólida) e o ruido médio de uma amostra antes de cada clique (linha pontilhada) (512-pt FFT, 500 kHz, Hann), (d) histograma da frequência de pico, (e) espectrograma concatenado dos cliques em ordem crescente do valor de pico de frequência (512-pt FFT, 500 kHz, Hann, sem sobreposição) e (f) histograma do intervalo-entre-cliques.



**Figura 6.12** - Mapa da Bacia de Santos com a distribuição dos eventos acústicos registrados para a toninha (*Pontoporia blainvilliei*). Nenhum desses registros teve confirmação visual. O ponto indicado com zero (0) na legenda representa um evento detectado em campo e posteriormente confirmado na análise. No entanto, todos os cliques associados ficaram abaixo do limiar de detecção (16 dB) adotado nas análises deste estudo.

## 6.3 DISCUSSÃO

Detectores e classificadores automáticos de cliques de ecolocalização configurados para diferentes espécies de odontocetos foram aplicados aos dados registrados em campo. Entre as espécies registradas destacam-se os grandes mergulhadores oceânicos (famílias Physeteridae, Kogiidae e Ziphiidae). São grupos especializados em explorar recursos alimentares na zona mesopelágica (200 a 1.000 m) e batipelágica (1.000 a 4.000 m) dos oceanos e produzem cliques regularmente de ecolocalização durante o forrageio (JOHNSON et al., 2004; MILLER et al., 2004). O detector de cliques do PAMGuard foi configurado com classificadores simples, mas que foram capazes de detectar e classificar corretamente estes grupos. A importância da aplicabilidade desta ferramenta em dados acústicos é ainda mais relevante, dado o fato de que a maior parte destas espécies são extremamente elusivas e raramente registradas através dos métodos visuais de amostragem. Na maior parte do tempo permanecem submersos e, quando vêm à superfície, o fazem por breves períodos, sem exibirem comportamentos conspícuos, podendo passar despercebidos numa amostragem que utilizasse somente o método visual. A exceção é o cachalote (*P.macrocephalus*), que apresenta um borriço visível e característico, além do que a espécie pode permanecer mais tempo na superfície (WHITEHEAD; WEILGART, 1991). Ainda assim, os cachalotes permanecem submersos cerca de 70% do tempo e os ciclos de mergulhos duram em média 45 minutos (WATWOOD et al., 2006).

### 6.3.1 Physeteridae

As detecções de cliques do cachalote (*Physeter macrocephalus*, Família Physeteridae) foram compostas de pequenas cadeias (fragmentadas pelo detector). Apesar uma da tendência observada no “Click Train Detector” de fragmentar cadeias de cliques mais longas, foi observado uma redução na ocorrência de falsos positivos. Esse aspecto foi especialmente importante, pois os cliques de cachalote apresentam frequência mais baixa que outros tipos de cliques, o que os torna mais suscetíveis à confusão com ruídos transientes mais comuns, como os gerados por embarcações. Os cliques detectados foram típicos daqueles descritos como “cliques usuais” (frequência de pico em cerca de 15 kHz e intervalo-entre-cliques entre 0,5 - 2,0 s), utilizados durante os mergulhos na procura e perseguição de presas (WAHLBERG,

2002; MØHL et al., 2003). O comportamento acústico e as características dos cliques detectados sugerem que os animais estavam em atividade de forrageio nessas áreas. Os eventos acústicos mais longos foram registrados principalmente no primeiro ano de coleta de dados (2015), sendo que nos anos seguintes houve uma tendência a detecções mais curtas e com menos indivíduos. Os registros do cachalote no Brasil se estendem por toda a costa brasileira (LODI; BOROBIA, 2013). De acordo com Di Tullio et al. (2016) foi a espécie mais frequentemente avistada durante cruzeiros de monitoramento de cetáceos nas águas da plataforma continental externa e do talude das regiões do sul do Brasil, mas os registros se concentraram ao sul da latitude de 28°S (altura do Cabo de Santa Marta em Santa Catarina), sugerindo uma maior densidade populacional em latitudes mais altas (ex: Bacia de Pelotas) em comparação com a região da Bacia de Santos. Essa distribuição pode estar relacionada à maior disponibilidade de presas nas regiões mais austrais, tal como a lula-argentina (*Ilex argentinus*), (HAIMOVICI et al., 2014; DI TULIO et al., 2016).

O cachalote (*Physeter macrocephalus*) é uma espécie de particular interesse em estudos de bioacústica devido à produção regular de cliques de ecolocalização. Os cliques dos cachalotes estão entre os sons biológicos mais potentes do reino animal, com níveis na fonte que podem ultrapassar 240 dB re 1 µPa (rms) (MOHL et al., 2000). Esses cliques estão dentro do espectro audível humano (abaixo de 20 kHz) e podem ser detectados a quilômetros de distância por meio de hidrofones (WATKINS et al., 1980; MADSEN et al., 2002). Além disso, a cadência regular com que os indivíduos emitem os cliques possibilita a contagem de animais e a estimativa de densidade populacional por meio de levantamentos acústicos com o uso de hidrofones rebocados (BARLOW; TAYLOR, 2005; BOISSEAU et al., 2024). Essas características tornam o cachalote uma espécie particularmente interessante para estudos acústicos voltados ao monitoramento e à conservação das populações. A espécie está exposta a vários impactos antropogênicos contemporâneos, comuns a muitas espécies de cetáceos, tal como os emalhes em petrechos de pesca, colisões com embarcações, perturbações decorrentes de atividades turísticas e diferentes formas de poluição marinha, incluindo a poluição sonora (LAIST et al., 2001, JACOBSEN et al., 2010, NOTARBARTOLO-DI-SCIARA, 2014, CURÉ et al., 2021, OLIVEIRA et al., 2022).

### 6.3.2 Kogiidae

Nos casos em que não foi possível confirmar a espécie por meio de avistagem, os eventos acústicos de cliques do tipo NBHF detectados em áreas oceânicas foram agrupados como *Kogia* spp. Estes eventos tipicamente tiveram curta duração (um ou dois minutos, ou até menos) e, na maioria das vezes, passaram despercebidos pelos observadores visuais, com exceção de um registro no qual foi observado um grupo identificado como do gênero *Kogia*, mas não foi possível identificar a espécie. As cadeias de cliques detectadas nestes eventos ocorreram quando os animais estavam posicionados mais próximo do arranjo de hidrofone (ângulos perpendiculares). Esse padrão está relacionado ao curto alcance dos cliques. Estima-se que cliques do tipo NBHF não se propagam por distâncias superiores a 500 metros, devido à forte absorção de sinais de frequências mais altas no ambiente marinho (MALINKA et al., 2021). Além disso, os cliques NBHF são emitidos a partir de uma abertura estreita, com alto grau de direcionalidade à frente da cabeça do animal (MALINKA et al., 2021), o que também reduz a probabilidade de detecção quando o animal não está alinhado com o arranjo de hidrofones. Os cliques se mostraram altamente estereotipados e concentrados em faixas de frequência com baixa incidência de ruído.

São duas espécies da família Kogiidae, o cachalote-anão (*K.sima*) e o cachalote-pigmeu (*Kogia breviceps*). Em duas raras exceções, os eventos acústicos de cliques NBHF foram acompanhados da avistagem e a espécie foi identificada como cachalote-anão (*K.sima*). Apesar da semelhança com os cliques de *Kogia* spp., a média da frequência de pico destes eventos foi cerca de 2,5 kHz menor. Na literatura, os cliques de *K.breviceps* foram descritos a partir de espécimes em tanques de reabilitação, após eventos de encalhes (MADSEN et al., 2005). Já para *K.sima*, as descrições incluíram gravações de grupos de animais em ambiente natural (MERKENS et al., 2018; MALINKA et al., 2021). As duas espécies produzem cliques similares, a média da frequência de pico reportada para *K.breviceps* em cativeiro foi de 130 kHz (MADSEN et al., 2005), enquanto para *K.sima* entre 117 e 129 kHz, a depender do contexto da gravação (MERKENS et al., 2018; MALINKA et al., 2021). A falta de estudos que descrevem os cliques de *K.breviceps* em ambiente natural dificulta as comparações e atualmente não é possível discriminar os cliques das duas espécies. As duas espécies são simpáticas, no entanto sugere-se que a distribuição de *K.breviceps* está concentrada em latitudes mais altas e *K.sima* prefere águas

ligeiramente mais quentes em latitudes mais baixas (JEFFERSON et al., 2015). Muito do que sabe sobre *Kogia* provém de encalhes, justamente pela dificuldade de estudar as espécies do gênero em ambiente natural. No Brasil, os encalhes de ambas espécies são reportados ao longo de toda a costa, com exceção da região norte (MOURA et al., 2016). Os encalhes de *K.sima* são melhor distribuídos ao longo da costa brasileira, enquanto *K.breviceps* são mais frequentes na região sul-sudeste, reforçando a sugestão da distribuição mais tropical de *K.sima*. (MOURA et al., 2016).

Os eventos de *Kogia* ssp foram sempre de cadeias regulares mais curtas, provavelmente de animais em mergulho ou deslocamento durante a passagem da embarcação pelo transecto, com o hidrofone rebocado a cerca de 20 a 25 m de profundidade. Já no caso dos eventos de *K.sima*, os animais foram vistos na superfície, além disso o hidrofone variou a profundidade durante as gravações (de 20 até 75 m), o que pode causar distorção angular na recepção dos cliques. Isto por si só pode explicar a variação observada no pico de frequência entre os eventos de *Kogia* ssp. e *K.sima*. Em outros estudos com cliques presumidamente de *Kogia* spp. gravados por hidrofones fixados no fundo, observou-se uma tendência a frequências de pico mais baixas (HILDEBRAND et al., 2019). Não foi possível afirmar se as diferenças observadas resultam de artefatos ou se refletem a presença de cliques de mais de uma espécie (*K. breviceps*) nos eventos sem confirmação visual.

Os cliques do tipo NBHF atribuídos a *Kogia* ssp. foram exclusivamente detectados em áreas oceânicas (entre 750 m a 2.640 m de profundidade). Além do gênero *Kogia*, não existem evidências que indiquem a presença regular de outras espécies com cliques similares em áreas oceânicas desta região do Atlântico Sul Ocidental. Outros grupos que podem produzir cliques similares são espécies do gênero *Cephalorhynchus* e *Lagenorhynchus* (família Delphinidae) ou membros da família Phocoenidae (MORISAKA; CONNOR, 2007), que são muito raros nesta região, e mesmo assim, de hábitos mais costeiros. A única espécie que pode fazer incursões oceânicas é o boto-de-óculos (*Phocoena dioptrica*) da família Phocoenidae, mais comum em águas temperadas frias, com alguns raros registros de encalhes no Brasil (PINEDO et al., 2002; LODI; BOROBIA, 2013). A toninha (*Pontoporia blainvileii*) também produz cliques NBHF (MELCÓN; FAILLA; IÑÍGUEZ, 2012), porém apresenta uma distribuição restrita às águas costeiras e estuarinas (AMARAL et al., 2018). Considerando a distribuição das espécies de odontocetos que produzem cliques NBHF nesta porção do Atlântico Sul Ocidental, os cliques NBHF detectados em áreas

oceânicas neste estudo podem ser atribuídos com alto grau de certeza a *Kogia* spp., mesmo na ausência de confirmação visual. Informações importantes para a conservação de kogídeos podem ser exploradas utilizando dados de MAP, como a ocorrência, distribuição e densidade (HODGE et al., 2008, HILDEBRAND et al., 2019, GRIFFITHS et al., 2020). Com base nos registros de monitoramento acústico passivo, os kogídeos demonstram ser significativamente mais frequentes do que se estimaria com base apenas nas avistagens.

### 6.3.3 Ziphidae

Considerando a possibilidade de ocorrência simultânea de diferentes espécies de zifídeos, cada evento foi analisado de forma independente. A discussão a seguir aborda os resultados obtidos com a aplicação de duas bandas de teste distintas na classificação automática dos cliques: MF (25–50 kHz) e HF (40–80 kHz). A análise espectral indicou que os eventos classificados como MF/HF (tanto cliques MF como HF detectados) provavelmente representam um único tipo de clique, com variações espectrais suficientes na faixa de 30 a 50 kHz para que cliques de um mesmo evento fossem classificados entre os dois tipos. Os eventos com cliques somente MF, apesar de apresentarem semelhanças com os MF/HF, se destacam por terem pico de frequência mais baixo e um decaimento mais acentuado nas frequências mais altas do espectro. Já os cliques do evento HF se mostraram claramente distintos dos demais, com pico de frequência mais alto, maior duração e uma modulação de frequência menos inclinada. O reduzido número de amostras por evento limitou a possibilidade de uma caracterização mais robusta dos diferentes tipos de cliques observados. Apesar do número limitado de cliques de zifídeos detectados, foi possível realizar uma comparação com as descrições encontradas na literatura.

Cada espécie de zifídeo é conhecida por produzir um tipo exclusivo de pulso FM (modulado em frequência), cujos parâmetros espectrais e o intervalo-entre-cliques podem auxiliar na identificação específica (ZIMMER et al., 2005; JOHNSON et al., 2006; GILLESPIE et al., 2009; WAHLBERG et al., 2011; BAUMANN-PICKERING et al., 2013; DEANGELIS et al., 2018; GRIFFITHS et al., 2019; CLARKE et al., 2019; VISER et al., 2022; BALLANCE et al., 2024). No Brasil são nove espécies de zifídeos atualmente reportadas. Deste total, cinco são registros esporádicos de espécies mais comumente encontradas em águas temperadas, subantárticas ou polares de todo o

Hemisfério Sul. Entre elas a baleia-bicuda-de-Arnoux (*Beradius arnuxii*), a baleia-bicuda-do-sul (*Hyperoodon planifrons*) e três espécies de *Mesoplodon*: baleia-bicuda-de-Layard (*M.layardi*), baleia-bicuda-de-Gray (*M.grayi*) e baleia-bicuda-de-Hector (*M.hectorii*). A presença no Brasil destas espécies é tida como rara (LODI; BOROBIA, 2013). Além destas espécies, outras duas também apresentam distribuição possivelmente circumpolar em águas mais frias do Hemisfério Sul e nunca foram registradas no Brasil, são elas a baleia-bicuda-de-Andrew (*Mesoplodon bowdoini*) e baleia-bicuda-de-Shepherd (*Tasmacetus shepherdii*) (JEFFERSON et al., 2015).

Outras quatro espécies de zifídeos com registros confirmados no Brasil possuem distribuição em águas tropicais e foram utilizadas como referência para comparações acústicas. Entre elas, a baleia-bicuda-de-Cuvier (*Ziphius cavirostris*) apresenta a distribuição mais ampla, ocorrendo desde águas polares até regiões tropicais de todos os oceanos (MACLEOD et al., 2006), enquanto a baleia-bicuda-de-Blainville (*Mesoplodon densirostris*) é cosmopolita em águas temperadas a tropicais (MACLEOD et al., 2006). A baleia-bicuda-de-Gervais (*Mesoplodon europaeus*) é endêmica do Atlântico, com registros em águas tropicais e temperadas-quentes do Brasil, incluindo encalhes nas regiões sudeste e nordeste (SANTOS et al., 2003; MARTINS et al., 2004; SANTOS et al., 2024). A baleia-bicuda-de-Ramara (*Mesoplodon eueu*), recentemente separada de *M.mirus*, possui registros esparsos no Hemisfério Sul, incluindo o litoral sudeste brasileiro (DELAUBOUT et al., 2007; CARROLL et al., 2021; SOUZA et al., 2005; MACLEOD et al., 2006; JEFFERSON et al., 2015). Assim, as comparações acústicas neste estudo focaram em três espécies com dados disponíveis: *Z.cavirostris* (ZIMMER et al., 2005), *M.densirostris* (JOHNSON et al., 2006) e *M.europaeus* (GILLESPIE et al., 2009), complementadas por descrições de cliques de *M.mirus* do Atlântico Norte para referência da espécie-irmã *M.eueu* (DEANGELIS et al., 2018). Durante os cruzeiros periódicos em transectos com ambos os métodos acústico e visual empregados na região, em nenhuma ocasião foi confirmado a presença de um zifídeo quando os cliques foram detectados. No entanto, houveram avistagens de zifídeos sem que os cliques fossem detectados. Foi possível confirmar visualmente a presença de três espécies: *Z.cavirostris*, *M.densirostris* e *M.europaeus* (uma avistagem para cada) (PETROBRAS, 2024). Na comparação dos cliques entre estas três espécies, os cliques de *Z.cavirostris* são tipicamente descritos com uma frequência de pico mais alta (40 kHz) e intervalo-entre-cliques maior (337 ms) do que *M.densirostris*. Já

*M.europaeus* o pico de frequência é ainda mais elevado (43,8 kHz) (BAUMANN-PICKERING et al., 2013).

Os eventos MF foram os mais semelhantes ao descrito para *M.densirostris*, espécie cujos cliques apresentam pico de frequência geralmente mais baixo do que de outras espécies, como *Z.cavirostris*, *M.europaeus* e *M.mirus*. A mediana da frequência de pico dos cliques MF foi a mais baixa entre os diferentes tipos de cliques analisados e o intervalo-entre-cliques esteve dentro do intervalo reportado para *M.densirostris* (BAUMANN-PICKERING et al., 2013). Baumann-Pickering et al. (2023) observaram diferenças geográficas no pico de frequência dos cliques de *M.densirostris*, inclusive com uma tendência a frequências mais baixas em latitudes mais altas. A mediana da frequência de pico entre diferentes regiões do mundo variou de 32 a 40 kHz. Se a hipótese de Baumann-Pickering et al. (2023) for válida, e os cliques aqui apresentados forem de fato atribuíveis a *M.densirostris*, a frequência de 39 kHz observada neste estudo estaria dentro do esperado para esta porção do oceano, em latitudes mais baixas (entre 23° e 27°S). Como foram registrados apenas dois eventos MF, sendo que apenas um deles teve mais de 10 cliques ( $n = 20$ ), as conclusões devem ser interpretadas com cautela. Amostras pequenas estão mais sujeitas a variabilidade e incertezas, o que pode dificultar e confundir os padrões diagnósticos utilizados para a identificação.

Os cliques MF/HF tiveram um pico de frequência mais alto (mediana 45 kHz) e o intervalo-entre-cliques um pouco mais baixo (252 ms) comparado ao clique MF. Estas características estão mais condizentes com *M.europaeus* ou *M.mirus*. Baumann-Pickering et al. (2013) observaram uma mediana de 43,8 kHz para cliques identificados como *M.europaeus*. Segundo DeAngelis et al. (2018), os cliques de *M.europaeus* são muito semelhantes aos de *M.mirus*, incluindo parâmetros de frequência, apesar de que para *M.mirus* o intervalo-entre-cliques observado foi menor (170 - 190 ms) do que *M.europaeus* (275 ms). A mediana do intervalo-entre-cliques dos cliques MH/HF (252 ms) foi mais semelhante aos valores descritos para *M.europaeus* (GILLESPIE et al., 2009). Enquanto *M.mirus* é uma espécie do Hemisfério Norte, não existem informações sobre as características dos cliques de *M.eueu*, que é a espécie reconhecida no Hemisfério Sul (CARROLL et al., 2021). Não se sabe, por exemplo, se os cliques de *M.eueu* são similares a *M.europaeus*, como observado para os cliques de *M.mirus* no Atlântico Norte. O que reforça a hipótese de que os cliques MH/HF são de *M.europaeus* é a aparente ocorrência mais comum

desta espécie na área de estudo. Em 2021 foi reportada a avistagem de um grupo de *M.europaeus* na latitude de 25° da Bacia de Santos, a cerca de 150 km da costa e a uma profundidade de cerca de 1.400 m (SANTOS et al., 2024). Em 2023 um indivíduo foi observado durante a coleta de dados deste estudo, também na latitude 25° da Bacia de Santos, em uma profundidade de cerca de 2.000 m. Além disso, também houveram registros recentes da espécie na região adjacente a Bacia de Santos mais ao norte, na Bacia de Campos (dados não publicados). Dada as evidências, *M.europaeus* parece ser a espécie candidata mais provável responsável pelos cliques do tipo MF/HF detectados neste estudo. Foram 40 cliques analisados no evento MF/HF selecionado para análise, sendo que outros sete eventos tiveram cliques similares, presumidamente também de *M.europaeus*, o que a tornaria a espécie de zifídeo mais frequentemente detectada acusticamente na região. O pico de frequência observado foi acima do reportado para os cliques das outras espécies, como *Z.cavirostris* e *M.densirostris* (BAUMANN-PICKERING et al., 2013). Entre os eventos MF/HF detectados, um deles ocorreu aproximadamente 1h 50min após a confirmação visual de um zifídeo identificado como *M.europaeus*. Ressalta-se, mais uma vez, que o número reduzido de amostras de cliques deve ser considerado na interpretação dos resultados. Dos oito eventos MF/HF registrados, quase metade continha menos de 10 cliques. Eventos com número muito reduzido de cliques (<10) podem não fornecer informações suficientes para a identificação da espécie, e uma amostragem mais ampla poderia revelar um padrão distinto.

Por último, houve um único evento acústico classificado como HF. Este tipo de clique foi facilmente distinguível dos demais. A frequência de pico observada, assim como a forma do espectro, não foi compatível com nenhuma das quatro espécies comparadas (*Z.cavirostris*, *M.densirostris*, *M.europaeus* e *M.mirus*), o que sugere que possa se tratar de uma outra espécie. A falta de gravações acústicas feitas na presença de indivíduos identificados em campo muitas vezes dificulta a associação de um determinado tipo de clique a uma determinada espécie. Dado que, por vezes, nem mesmo aspectos básicos da biologia de muitos zifídeos são conhecidos, muitas espécies carecem de gravações acústicas feitas na presença de indivíduos identificados em campo. Baumann-Pickering et al. (2013), por exemplo, descreveram cliques FM coletados por gravadores autônomos em diferentes bacias oceânicas (Pacífico Norte e Golfo do México), sendo possível identificar sete espécies com base no conhecimento prévio sobre as características dos cliques e a distribuição

geográfica das espécies. Os autores também relataram outros cinco tipos de cliques FM que não puderam ser associados a nenhuma espécie conhecida. A nomenclatura dos cliques não-identificados segue um padrão das iniciais BW (*beaked whale*), seguido do valor da frequência de pico em kHz ou a abreviação da localidade em que foi registrado, como BWG em referência ao Golfo do México, por exemplo (BAUMANN-PICKERING et al., 2013). O clique HF observado neste estudo será chamado daqui para frente de BWBR, em referência a localidade em que foi detectado (Brasil).

Foi observado semelhanças dos cliques BWBR, com descrições de cliques não-identificados do Pacífico (BWC), Golfo do México (BWG) (BAUMANN-PICKERING et al. 2013; MCCULLOUGH et al. 2024) e mais recentemente na costa Atlântica da África (BWWA) (RUNTE et al., 2025). Estas semelhanças estão mais relacionadas a uma tendência de os cliques serem mais longos e apresentar uma banda de frequência mais larga, comparado os cliques típicos das outras espécies de zifídeos. Ainda assim, o clique BWBR se destacou por apresentar uma frequência de pico mais elevada (mediana de 62 kHz) em comparação aos demais tipos encontrados nas outras regiões. O intervalo-entre-cliques foi próximo ao reportado para os cliques BWC e BWG (Pacífico e Golfo do México) e menor do que BWWA (Atlântico Sul Oriental). Baumann-Pickering et al. (2013) descreveram os cliques BWC e BWG como acusticamente semelhantes. Em um estudo mais recente e abrangente, McCullough et al. (2024) investigaram a distribuição geográfica e os padrões temporais dos cliques BWC em várias regiões do Pacífico. Os autores identificaram uma distribuição predominantemente tropical e um padrão de atividade noturno bem definido na emissão desses cliques. Outro achado relevante foi a associação dos cliques BWC com águas relativamente rasas, em torno de 150 metros de profundidade, sugerindo que o forrageio dessa espécie desconhecida ocorre próximo à camada mesopelágica superior. Além disso, McCullough et al. (2024) destacaram a presença de cliques de banda larga, semelhantes aos produzidos por delfinídeos, ocorrendo nos mesmos eventos acústicos em que os cliques FM foram detectados.

Um outro tipo de clique recentemente descrito no Atlântico Sul Oriental, na costa africana da ilha de São Tomé e Príncipe (Golfo da Guiné). Este clique foi denominado de BWWA (*West Africa*) e apresenta pico de frequência em 52 kHz, duração de 843 µs e intervalo-entre-cliques 86 ms (cliques > 20 dB) (RUNTE et al., 2025). O clique BWWA tem uma frequência mais baixa do que observada para o clique

BWBR deste estudo. Já o intervalo-entre-cliques foi menor e a duração mais longa do que os cliques BWBR. Os autores relatam que, num intervalo de quase um ano de monitoramento, o clique BWWA foi detectado regularmente por vários meses exclusivamente no período noturno e não foi possível associar os cliques a nenhuma espécie. O que chama atenção dos cliques BWG e BWWA são justamente as peculiaridades dos cliques (mais longos com largura de nada mais larga e intervalo-entre-cliques mais baixo) e o fato de ambos serem produzidos majoritariamente ou exclusivamente no período noturno em águas tropicais ou subtropicais (MCCULLOUGH et al. 2024; RUNTE et al., 2025). Já o clique BWBR aqui descrito, como se trata de um único e breve evento acústico, não é possível fazer comparações sobre a distribuição espacial ou temporal dos cliques. O evento ocorreu no dia 06/07/2020 às 16:48h, portanto durante o período diurno, ainda que já se aproximando do período crepuscular. O evento BWBR ocorreu em uma área tropical (latitude 23,9°) na borda inferior do talude, a uma profundidade local de cerca de 417 m e distância de cerca de 100 km da costa do Rio de Janeiro. Foi o único evento acústico de zifídeo observado nas águas mais rasas. Excluindo este evento, a média de profundidade local dos outros 10 eventos acústicos de zifídeos foi de 1.893 m ( $\pm 359$ ). As características dos cliques BWBR, bem como o contexto de sua detecção, indicam que pertencem a uma espécie diferente da observada nos outros encontros. Isto se for assumido que nenhuma espécie tenha mais de um tipo de clique FM, ou seja, cada clique FM é espécie-específico e exclusivo. Isto é o que se tem observado na maior parte dos casos (BAUMANN-PICKERING et al. 2013; MCCULLOUGH et al. 2024). No entanto, é possível que isto não seja verdade para todas as espécies. No Pacífico, Dong et al., (2025) descreveu dois tipos de cliques FM da baleia-bicuda-de-Deraniyagala (*Mesoplodon hotaula*) durante o mesmo evento acústico. A principal diferença observada foi na frequência de pico. Os autores não souberam dizer se as diferenças são categorias funcionais ou variações devido a efeitos de propagação.

O clique BWBR se assemelha aos cliques BWC, BWG e BWSA descritos para zifídeos em regiões tropicais do Pacífico, Golfo do México e Atlântico Sul Oriental, respectivamente. No entanto, foram observadas diferenças, principalmente na frequência de pico. No Pacífico, McCulloug et al. (2024) observou que além dos cliques FM (frequência modulada), a espécie responsável pelos cliques BWC também produziram cliques de banda larga. No breve evento acústico dos cliques BWBR registrado neste estudo, foi observada uma sequência de poucos cliques de banda

larga detectados pouco antes dos cliques FM, em ângulos de direção entre 25° e 35°. Cerca de 10 segundos depois, um clique FM foi detectado na mesma direção, e aproximadamente um minuto e meio depois, a cadeia de algumas dezenas de cliques BWBR foi detectada em ângulos entre 60° e 150°. Durante as atividades de campo, os operadores de MAP avisaram a equipe de avistagem da detecção acústica de zifídeo e a embarcação diminuiu a velocidade. Foi avistado um animal na popa da embarcação e foi feita uma manobra na tentativa de aproximação, porém o animal não foi mais visto e não foi possível tirar fotos ou identificar a espécie, sendo classificado como um “cetáceo não-identificado”. Poucos minutos depois foi avistado pela equipe visual um grupo de cinco indivíduos da orca-pigméia (*Feresa attenuata*) e foram detectados alguns assovios, cliques e “buzzes”. Os únicos cliques considerados no evento dos cliques BWBR foram aqueles classificados pelo detector e confirmados como cliques FM, sendo que os cliques de banda larga foram desconsiderados da análise. Devido a presença do grupo de *F.attenuata*, confirmado visualmente minutos após a detecção da cadeia de cliques BWBR, não foi possível afirmar se a espécie responsável pelo clique BWBR também produziu cliques de banda larga, tal como mostrado por McCulloug et al. (2024) para os cliques BWC. A possibilidade de os cliques FM serem produzidos pelo grupo de *F.attenuata* é pouco plausível, uma vez que não se tem conhecimento de nenhuma espécie de delfinídeo que produza este tipo de clique (somente zifídeos). Além disso, algumas detecções feitas na presença de *F.attenuata* durante este estudo, sem a presença de nenhuma outra espécie, foram constatados apenas a presença de cliques de banda larga típicas dos delfinídeos, mas nunca cliques FM. Por último, o fato de um outro cetáceo não-identificado ter sido avistado um pouco antes do grupo de *F.attenuata*, reforça que estes cliques possam ter vindo deste animal ao invés do grupo de *F.attenuata*. Considerando as limitações da amostragem e a escassez de registros acústicos de zifídeos nesta área, é possível que esse sinal represente um tipo de clique FM ainda não descrito e associado a uma espécie cuja as características permanecem desconhecidas.

O fato de se tratar de uma espécie ainda não documentada acusticamente para esta região do Atlântico Sul, se soma a outros registros ao redor do mundo, onde cliques de zifídeos foram detectados, mas sem que fosse possível identificar com precisão a espécie associada (BAUMANN-PICKERING, et al., 2013; TRICKEY et al., 2015; BARLOW; CHEESEMAN; TRICKEY, 2021; RUNT et al., 2025). Apesar dos avanços, muitos tipos de cliques FM de zifídeos descritos na literatura ainda carecem

de associação a espécies específicas, justamente pela falta de dados inequívocos que confirmem a correspondência entre o clique e a espécie (BAUMANN-PICKERING et al., 2010; TRICKEY et al., 2015; GRIFFTHIS et al., 2019; BARLOW; CHEESEMAN; TRICKEY, 2021; BALLANCE et al., 2024; DONG et al., 2025). Por exemplo, foi sugerido que o clique BWC, registrado no Pacífico, pertença à baleia-bicuda-de-ginkgo (*Mesoplodon ginkgodens*); no entanto, essa associação ainda não pôde ser confirmada. A presença de cliques similares (BWG) no Atlântico Norte (Golfo do México), região fora da distribuição conhecida de *M. ginkgodens*, levanta a hipótese de que esses cliques possam, na verdade, ser produzidos por outra espécie (BAUMANN-PICKERING et al., 2013; MCCULLOUGH et al., 2024). Há, inclusive, a possibilidade de que alguns desses cliques não identificados sejam atribuídos a espécies ainda desconhecidas. Os cliques BWC, BWG e BWWA descritos na literatura e o clique BWBR aqui descrito podem ser emitidos por espécies que utilizam habitats semelhantes ou compartilham estratégias de forrageio similares, sendo o padrão de clique resultado de uma evolução convergente que favorece esse tipo de sinal acústico em função de aspectos ecológicos, como o tipo de ambiente ou dieta. Alternativamente, a semelhança pode estar relacionada a espécies que são próximas evolutivamente, ou mesmo subespécies ou variações geográficas (BAUMANN-PICKERING, et al., 2013; MCCULLOUGH et al., 2024; RUNT et al., 2025). Somente dos anos 90 para cá foram cinco novas espécies de zifídeos descritas ou elevadas ao status de espécie (REYES et al., 1991; DALEBOUT et al., 2002; DALEBOUT et al., 2014; YAMADA et al., 2019; CARROLL et al., 2021). Algumas espécies nunca foram vistas em ambiente natural e as descrições provém de carcaças (THOMPSON et al., 2012). Além disso, as características que separam algumas espécies também são difíceis de observar em campo (MACLEOD et al., 2006; JEFERSON et al., 2015).

Os zifídeos compõe cerca de 30% da biodiversidade mundial de cetáceos, e apesar dos avanços nas últimas décadas (HOOKER et al., 2009), ainda existem lacunas sobre a ocorrência e distribuição de muitas espécies. Isto ressalta a importância de se expandir os esforços de monitoramento para regiões como o Atlântico Sul, que historicamente receberam pouca atenção em estudos de monitoramento acústico passivo de zifídeos. Além disso, os zifídeos parecem ser um grupo especialmente sensíveis a impactos antropogênicos e a expansão de atividades humanas, o que requer atenção especial a este grupo (FEYRER et al., 2024). Os casos mais notáveis de impacto nesses animais envolvem a relação de testes de

sonares militares de média frequência (MFAS) e encalhes em massa, ocorridos em diferentes partes do mundo (COX et al., 2006, D'AMICO et al., 2009). A falta de informações sobre a biologia e ecologia dessas espécies impõe desafios à implementação de medidas eficazes de conservação dos zifídeos. Em suma, os desafios inerentes à detecção e identificação dos zifídeos dificultam a aplicação de medidas de conservação adequadas. Nesse contexto, o monitoramento acústico passivo destaca-se como uma abordagem promissora para aprofundar a compreensão dos padrões ecológicos dessas espécies (HILDEBRAND et al., 2015, BOISSEAU et al., 2023).

#### 6.3.4 Pontoporiidae

Os cliques da toninha (*P.blainvilliei*) são descritos como do tipo NHBF, com frequência de pico que ultrapassa os 100 kHz (MELCÓN; FAILLA; IÑÍGUEZ, 2012). Esse pequeno odontoceto (tamanho máximo 1,7 m) pertence a uma família monotípica (Pontoporiidae) que está filogeneticamente mais próxima de botos e golfinhos de rio, como o boto-da-Amazônia (*Inia geoffrensis*) (CASSENS et al., 2000). A espécie é endêmica do Atlântico Sul Ocidental, ocorrendo em áreas estuarinas e marinhas costeiras entre o sudeste do Brasil e o norte da Patagônia na Argentina (CRESPO, 2018).

Os eventos acústicos descritos e atribuídos a *P.blainvilliei* deste estudo foram registrados em águas costeiras da Bacia de Santos (até 45 m) e confirmados como cliques de alta frequência e banda estreita (NBHF). A média da frequência de pico foi 130 kHz, sem praticamente nenhuma energia significativa em frequências abaixo de 100 kHz. Melcón, Failla e Iñíguez (2012) coletaram dados acústicos na presença de *P.blainvilliei* em um estuário no norte da Patagônia, Argentina. A coleta foi feita utilizando um hidrofone lançado a partir de uma embarcação com o motor desligado. O estudo relatou a detecção de cliques com frequência de pico média de 139 kHz, duração média de 212 µs e intervalo-entre-cliques de 33 ms. Na região costeira do sudeste do Brasil, Barcellos e Santos (2021) descreveram cliques de ecolocalização NBHF atribuídos a *P.blainvilliei*, coletados a partir de dados obtidos por um gravador acústico autônomo. Os cliques apresentaram frequência de pico média de 104 kHz, duração de 668 µs e intervalo-entre-cliques de 30 ms. No estuário do Rio da Prata (Uruguai), Tellechea, Ferreira e Norbis (2017) utilizaram boias acústicas para registrar

sons na presença de *P.blainvilliei*. Foram identificados diferentes tipos de cliques, com frequências de pico variando entre 14 e 86 kHz. No entanto, limitações do equipamento de gravação impediram a detecção de frequências superiores a 100 kHz, restringindo a caracterização completa de cliques do tipo NBHF. Giardino et al. (2024) reportaram cliques de *P.blainvilliei* em ambiente natural, registrados por um gravador autônomo fixado em uma rede de pesca na costa da Argentina. Os cliques apresentaram frequência de pico média de 134 kHz e duração de 60 µs, porém o valor do intervalo-entre-cliques não foi informado. Em estudos realizados com neonatos em cativeiro ou confinados no ambiente natural, foram relatados a emissão de cliques de banda mais larga (TELLECHEA; NORBIS, 2014; MELCÓN; FAILLA; IÑÍGUEZ, 2016; GIARDINO et al., 2024). Os cliques atribuídos a *P.blainvilliei* descritos neste estudo apresentaram frequência de pico média inferior à registrada por Melcón, Failla e Iñíguez (2012) e Giardino et al. (2024), porém superior à observada por Barcellos e Santos (2021) e por Tellechea, Ferreira e Norbis (2016). Já os parâmetros de duração foram relativamente consistentes entre os estudos, com exceção da duração mais longa dos cliques em Barcellos e Santos (2021) e mais curtos em Giardino et al. (2024). As variações observadas na frequência de pico podem estar associadas a diferenças entre metodologias, plataformas de gravação, equipamentos utilizados, assim como a distância e posição relativa entre os animais e os hidrofones no momento da detecção. Por exemplo, pelo método empregado, é possível que Melcón, Failla e Iñíguez (2012) tenham registrado os cliques a distâncias mais curtas dos animais, o que pode ter favorecido a captação de componentes de frequência mais elevada. Além disso, é plausível que *P.blainvilliei* ajuste características dos cliques de acordo com as características do habitat. Paitach et al. (2022), utilizando detectores automáticos (C-PODs), compararam os cliques NBHF de *P.blainvilliei* registrados em um complexo estuarino e em um ambiente costeiro aberto, observando que, no estuário, os cliques apresentavam maior largura de banda. Portanto, é também possível que os valores mais altos de frequência de pico dos cliques, como os observados por Melcón, Failla e Iñíguez (2012) no ambiente estuarino, possam representar uma adaptação a ambientes altamente reverberantes.

A caracterização dos cliques de *P.blainvilliei* apresentada, bem como a sua comparação com outros estudos, deve ser considerada preliminar, uma vez que foi analisado um número limitado de cliques e eventos acústicos, possivelmente insuficiente para representar toda a variabilidade dos cliques emitidos por essa

espécie. Diversos fatores contribuíram para a baixa taxa de detecção observada no presente estudo. Primeiramente, a embarcação seguiu transectos em zigue-zague entre regiões oceânicas e costeiras, o que resultou em uma amostragem mais esparsa das áreas costeiras. Além disso, por questões de segurança relacionadas ao arrasto do hidrofone em águas rasas, áreas com profundidade inferior a 20 metros não foram amostradas. Mesmo nas regiões entre 20 e 40 metros de profundidade, os registros apresentaram elevados níveis de ruído, associados à configuração do arranjo de hidrofones, rebocado com um lançamento de cabo curto (150 m) e hidrofone mais raso (8 m), o que favoreceu a captação de ruídos, especialmente os provenientes de cavitação da própria embarcação. Um dos eventos acústicos, por exemplo, continha apenas cliques com relação sinal-ruído abaixo do limiar estabelecido (16 dB) e, portanto, foi descartado da análise. Por fim, vale ressaltar que os cliques NBHF, por sua natureza, são de difícil detecção a distâncias superiores a 500 metros, devido à forte atenuação das frequências altas no ambiente aquático, especialmente em áreas costeiras e estuarinas (URICK, 1983).

Os cliques NBHF são produzidos por pelo menos outras 15 espécies de odontocetos. Entre elas seis espécies da família Phocoenidae, seis espécies da família Delphinidae (quatro do gênero *Cephalorynchus*, e duas espécies do gênero *Lagenorhynchus*), duas espécies da família Kogiidae e uma da família Pontoporiidae (*P.blainvilliei*) (GALATIUS et al., 2019). Entre esses grupos, os kogídeos e pontoporídeos são os que apresentam distribuição geográfica que abrange a área da Bacia de Santos. Na comparação entre os cliques atribuídos a *P.blainvilliei* e os cliques NBHF de Kogia, o primeiro apresentou uma frequência de pico mais elevada, embora com um pico espectral menos acentuado. Não foram realizadas comparações entre os cliques NBHF de *P.blainvilliei* e Kogia, dado que as espécies apresentam um padrão distinto de distribuição longitudinal que foi suficiente para separá-las (*P.blainvilliei* em áreas costeiras e *Kogia* ssp. em regiões oceânicas). No caso da família Phocoenidae (focenídeos), a maioria das espécies que ocorrem no Atlântico Sul Ocidental está associada a águas mais frias ao sul da região (JEFFERSON et al., 2015). No entanto, duas espécies dessa família possuem registros de ocorrência na costa brasileira, embora sejam registros pontuais de indivíduos encalhados em praias do sul do país: o boto-de-Burmeister (*Phocoena spinipinnis*) e o boto-de-óculos (*Phocoena dioptrica*). O limite norte da distribuição de *P.spinipinnis* no Atlântico parece estar associado à Convergência Subtropical do Atlântico (30-40°S) (MOLINA-SCHILLER et al., 2005). O

registro mais setentrional de encalhe da espécie ocorreu em Balneário Rincão, Santa Catarina ( $28^{\circ}\text{S}$ ) (SIMÕES-LOPES ; XIMENEZ, 1989). Já *P.dioptrica* apresenta uma distribuição circumpolar em águas temperadas frias, subantárticas e antárticas, incluindo áreas oceânicas dessas regiões (GOODALL, 2009, JEFFERSON et al., 2015). Os poucos registros no Brasil referem-se a encalhes no sul do país, sendo que o registro mais ao norte já registrado foi em Navegantes, Santa Catarina ( $26^{\circ}\text{S}$ ) (PETROBRAS, 2017). Ambas as espécies são, portanto, consideradas raras no Brasil, com ocorrência limitada a eventos ocasionais de encalhe. Os cliques de *P.spinipinnis* foram descritos por Reyes Reyes et al. (2018) como cliques NBHF, com pico de frequência médio de 135 kHz e intervalo-entre-cliques de 51 ms. Essas características sugerem diferenças em relação aos cliques de *P.blainvilliei*, embora comparações mais detalhadas ainda sejam necessárias. No caso de *P.dioptrica*, trata-se da única espécie da família Phocoenidae para a qual ainda não há descrições das características acústicas dos cliques. No entanto, presume-se que também produza cliques NBHF, como os demais membros da família. Embora seja pouco provável, a ocorrência de focenídeos no limite sul da área de estudo não pode ser descartada. Portanto, nessa região, os cliques NBHF atribuídos a *P.blainvilliei* devem levar em consideração a possibilidade, ainda que rara, de ocorrência de outras duas espécies que também produzem cliques semelhantes. Essa probabilidade é maior durante o inverno, quando há intrusões de águas mais frias e menos salinas em direção ao sul do Brasil (MOLINA-SCHILLER et al., 2005). Os dois eventos de cliques NBHF analisados neste estudo foram detectados na primavera na latitude de  $23^{\circ}\text{S}$ , na costa do estado de São Paulo. Um outro evento foi registrado no outono, na latitude  $27^{\circ}\text{S}$ , ao norte da Ilha de Santa Catarina, mas não foi considerado na análise devido à baixa relação sinal/ruído dos cliques. Os dois eventos acústicos analisados neste estudo podem ser atribuídos com alto grau de certeza a *P.blainvilliei*, uma vez que as detecções ocorreram em águas costeiras mais ao norte, em regiões situadas acima do limite de distribuição das duas espécies de focenídeos. A caracterização acústica dos cliques dessas espécies de focenídeo é fundamental para futuras comparações, especialmente no caso de *P.dioptrica*, que permanece como a única espécie da família sem descrições de seus cliques.

Os métodos visuais para monitoramento de toninhas são limitados devido ao seu comportamento críptico. Trata-se de animais pequenos, pouco gregários e que raramente exibem comportamentos aéreos. Além disso, os ambientes que habitam

geralmente apresentam águas turvas, o que dificulta ainda mais a observação direta (CRESPO, 2018). Nesse contexto, o monitoramento acústico passivo surge como uma alternativa viável para o estudo das populações de *P.blainvilliei*. O uso de tecnologias de monitoramento acústico passivo tende a reduzir significativamente os custos operacionais associados aos estudos de campo com *P.blainvilliei*. A espécie enfrenta um risco real de extinção, sendo classificada como “criticamente em perigo”, pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2022). Uma das principais causas é o elevado número de capturas accidentais em redes de pesca, um impacto considerado insustentável em diversas localidades (SECHI et al., 2021). O monitoramento acústico passivo pode contribuir para ampliar e aprofundar o conhecimento sobre as áreas de ocorrência, uso do habitat e estimativas de abundância da espécie, fornecendo subsídios para estratégias de conservação.

## 6.4 CONCLUSÕES

Os detectores automáticos de cliques de ecolocalização aplicados em diferentes linhagens de odontocetos demonstraram potencial para a classificação automática das espécies. Em particular, os cliques do cachalote (*Physeter macrocephalus*, família Physeteridae), bem estudados do ponto de vista bioacústico, mostraram-se claramente distintos dos demais, evidenciando a eficácia do método, inclusive em estudos sobre a ecologia da espécie, como o uso do habitat e as estimativas de densidade populacional.

No caso da família Kogiidae, composta por duas espécies, foi confirmada visualmente a presença do cachalote-pigmeu (*Kogia sima*) na Bacia de Santos, e seus cliques foram analisados e caracterizados de forma inédita. Diversas detecções acústicas de cliques NBHF foram atribuídas ao gênero *Kogia*, apesar de não terem sido confirmadas visualmente, no entanto ainda não foi possível distinguir entre as duas espécies do gênero. Ainda assim, ficou demonstrado o potencial de aplicação dos métodos apresentados, que, assim como no caso dos cachalotes, podem ser empregados em estudos ecológicos e estimativa populacional. No entanto, o fato de os cliques de *Kogia* serem do tipo NBHF representa desafios adicionais: sua forte atenuação e curto alcance dificultam a detecção, além de exigirem equipamentos com alta taxa de amostragem, nem sempre disponíveis nos pacotes acústicos de diferentes plataformas de coleta, como gliders ou boias acústicas.

Na família Ziphidae (baleias-bicudas), os detectores e classificadores automáticos permitiram identificar cliques com características distintas, possivelmente associadas a três espécies diferentes presentes na região, evidenciando o potencial do método para discriminação acústica de espécies pouco estudadas. Apesar do número reduzido de amostras, os resultados permitiram sugerir a ocorrência de duas espécies, apoiando-se na distribuição geográfica conhecida, nos registros de ocorrência e nas características dos cliques descritas na literatura. Essa indicação reforça o potencial dos métodos empregados para a identificação acústica mesmo em contextos com dados limitados. Um terceiro tipo não pode ser associado a nenhuma espécie e talvez seja uma espécie ainda não documentada acusticamente para esta região do Atlântico Sul. No entanto, a escassez de cliques detectados limita a possibilidade de conclusões mais robustas, ressaltando a necessidade de um esforço

direcionado para a coleta de um volume mais expressivo de dados acústicos de zifídeos nesta região.

Por fim, a caracterização preliminar dos cliques NBHF registrados em ambiente costeiro indicou uma forte associação com a toninha (*Pontoporia blainvilliei*), ainda que, no sul do Brasil, possam ocorrer raramente outras espécies com cliques potencialmente semelhantes (família Phocoenidae). Por se tratar de uma espécie costeira elusiva e sujeita a diversas ameaças, o monitoramento acústico passivo mostra-se uma ferramenta essencial para o acompanhamento e a conservação de suas populações.

## REFERÊNCIAS

- AMARAL, Karina Bohrer et al. Reassessment of the franciscana *Pontoporia blainvilliei* (Gervais & d'Orbigny, 1844) distribution and niche characteristics in Brazil. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, v. 508, p. 1-12, 2018.
- AU, Whitlow W. **The sonar of dolphins**. New York: Springer-Verlag, 1993.
- BALLANCE, Lisa T. et al. Acoustic recordings, biological observations, and genetic identification of a rare (?) beaked whale in the North Pacific: *Mesoplodon carlhubbsi*. **Marine Mammal Science**, v. 40, n. 1, p. 123-142, 2024.
- BARCELLOS, Diogo D.; SANTOS, Marcos C. Echolocation characteristics of franciscana dolphins (*Pontoporia blainvilliei*). **Marine Mammal Science**, v. 37, n. 3, 2021.
- BARLOW, Jay; TAYLOR, Barbara L. Estimates of sperm whale abundance in the northeastern temperate Pacific from a combined acoustic and visual survey. **Marine Mammal Science**, v. 21, v.3, p.429-445, 2005.
- BARLOW, Jay; CHEESEMAN, Ted; TRICKEY, Jennifer S. Acoustic detections of beaked whales, narrow-band high-frequency pulses and other odontocete cetaceans in the Southern Ocean using an autonomous towed hydrophone recorder. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 193, p. 104973, 2021.
- BAUMANN-PICKERING, Simone et al. Echolocation signals of a beaked whale at Palmyra Atoll. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 127, n. 6, p. 3790-3799, 2010.
- BAUMANN-PICKERING, Simone et al. Species-specific beaked whale echolocation signals. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 134, n. 3, p. 2293-2301, 2013.
- BAUMANN-PICKERING, Simone et al. Geographic differences in Blainville's beaked whale (*Mesoplodon densirostris*) echolocation clicks. **Diversity and Distributions**, v. 29, n. 4, p. 478-491, 2023.
- BOISSEAU, Oliver et al. Acoustic density estimates of beaked whales off the mid-Atlantic coast of the USA in winter and spring. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 199, p. 104108, 2023.
- BOISSEAU, Oliver et al. Acoustic estimates of sperm whale abundance in the Mediterranean Sea as part of the ACCOBAMS Survey Initiative. **Frontiers in Marine Science**, v. 11, p. 1164026, 2024.
- CARROLL, Emma L. et al. Speciation in the deep: genomics and morphology reveal a new species of beaked whale *Mesoplodon eueu*. **Proceedings of the Royal Society B**, v. 288, n. 1961, p. 20211213, 2021.
- CASSENS, Insa et al. Independent adaptation to riverine habitats allowed survival of ancient cetacean lineages. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 97, n. 21, p. 11343-11347, 2000.

CLARKE, Emma et al. Click characteristics of northern bottlenose whales (*Hyperoodon ampullatus*) and Sowerby's beaked whales (*Mesoplodon bidens*) off eastern Canada. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 146, n. 1, p. 307-315, 2019

CRESPO, Enrique A. Franciscana dolphin: *Pontoporia blainvilliei*. In: **Encyclopedia of Marine Mammals**. Academic Press, 2018. p. 388-392.

COX, Tara M. et al. Understanding the impacts of anthropogenic sound on beaked whales. **Journal of Cetacean Research and Management**, v. 7, n. 3, p. 177-187, 2005.

CURÉ, Charlotte et al. Severity scoring of behavioral responses of sperm whales (*Physeter macrocephalus*) to novel continuous versus conventional pulsed active sonar. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 9, n. 4, p. 444, 2021

D'AMICO, Angela et al. Beaked whale strandings and naval exercises. **Aquatic Mammals**, v. 35, n. 4, p. 452-472, 2009.

DEANGELIS, Annamaria Izzi et al. A description of echolocation clicks recorded in the presence of True's beaked whale (*Mesoplodon mirus*). **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 144, n. 5, p. 2691-2700, 2018.

DALEBOUT, Merel L. et al. A divergent mtDNA lineage among *Mesoplodon* beaked whales: molecular evidence for a new species in the tropical Pacific? **Marine Mammal Science**, 2007.

DALEBOUT, Merel L. et al. Resurrection of *Mesoplodon hotaula* Deraniyagala 1963: A new species of beaked whale in the tropical Indo-Pacific. **Marine Mammal Science**, v. 30, n. 3, p. 1081-1108, 2014.

DALEBOUT, Merel L. et al. A new species of beaked whale *Mesoplodon perrini* sp. n. (Cetacea: Ziphiidae) discovered through phylogenetic analyses of mitochondrial DNA sequences. **Marine Mammal Science**, v. 18, n. 3, p. 577-608, 2002.

DI TULLIO, Juliana Couto et al. Diversity and distribution patterns of cetaceans in the subtropical southwestern Atlantic outer continental shelf and slope. **PLoS One**, v. 11, n. 5, p. e0155841, 2016.

DONG, Lijun et al. Echolocation signals recorded in the presence of Deraniyagala's beaked whales (*Mesoplodon hotaula*) in the western Pacific (South China Sea) indicate species-specificity and intraspecific variation. **Marine Mammal Science**, v. 41, n. 1, p. e13179, 2025.

FEYRER, Laura J.; STANISTREET, Joy E.; MOORS-MURPHY, Hilary B. Navigating the unknown: assessing anthropogenic threats to beaked whales, family Ziphiidae. **Royal Society Open Science**, v. 11, n. 4, p. 240058, 2024.

GALATIUS, Anders et al. Raising your voice: evolution of narrow-band high-frequency signals in toothed whales (Odontoceti). **Biological Journal of the Linnean Society**, v. 126, n. 2, p. 213-224, 2019.

GIARDINO, Gisela V. et al. Detailed comparison of acoustic signals from rehabilitated and wild franciscanas (*Pontoporia blainvilliei*) dolphins. **Animals**, v. 14, n. 16, p. 2436, 2024.

GILLESPIE, Douglas et al. PAMGuard: Semiautomated, opensource software for real-time acoustic detection and localisation of cetaceans. **Proceedings of the Institute of Acoustics**, v.30, n.5, 2008.

GILLESPIE, Douglas et al. Field recordings of Gervais' beaked whales *Mesoplodon europaeus* from the Bahamas. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 125, n. 5, p. 3428-3433, 2009.

GOODALL, R. N. P. Spectacled porpoise: *Phocoena dioptrica*. In: **Encyclopedia of Marine Mammals**. Academic Press, 2009. p. 1087-1091.

GRIFFITHS, Emily T. et al. Description of a new beaked whale echolocation pulse type in the California Current. **Marine Mammal Science**, v. 35, n. 3, p. 1058-1069, 2019.

GRIFFITHS, Emily T. et al. Detection and classification of narrow-band high frequency echolocation clicks from drifting recorders. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 147, n. 5, p. 3511-3522, 2020.

HAIMOVICI, Manuel et al. Abundance, distribution and population dynamics of the short fin squid *Illex argentinus* in Southeastern and Southern Brazil. **Fisheries Research**, v. 152, p. 1-12, 2014.

HILDEBRAND, John A. et al. Passive acoustic monitoring of beaked whale densities in the Gulf of Mexico. **Scientific Reports**, v. 5, n. 1, p. 16343, 2015.

HILDEBRAND, John A. et al. Assessing seasonality and density from passive acoustic monitoring of signals presumed to be from pygmy and dwarf sperm whales in the Gulf of Mexico. **Frontiers in Marine Science**, v. 6, p. 66, 2019.

HODGE, Lynne E.W. et al. Heard but not seen: Occurrence of *Kogia* spp. along the western North Atlantic shelf break. **Marine Mammal Scince**., v. 34, n. 4, p. 1141-1153, 2018.

HOOKER, Sascha K. et al. Future directions in research on beaked whales. **Frontiers in Marine Science**, v. 5, p. 514, 2019.

JACOBSEN, Jeff K.; MASSEY, Liam; GULLAND, Frances. Fatal ingestion of floating net debris by two sperm whales (*Physeter macrocephalus*). **Marine Pollution Bulletin**, v. 60, n. 5, p. 765-767, 2010.

JEFFERSON, Thomas A, WEBBER, Marc A.; PITMAN, Robert L. **Marine mammals of the world: a comprehensive guide to their identification**. Amsterdam: Academic Press, Elsevier, 2nd edition, 2015.

JOHNSON, Mark et al. Beaked whales echolocate on prey. **Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences**, v. 271, n. suppl\_6, p. S383-S386, 2004.

JOHNSON, M. et al. Foraging Blainville's beaked whales (*Mesoplodon densirostris*) produce distinct click types matched to different phases of echolocation. **Journal of Experimental Biology**, v. 209, n. 24, p. 5038-5050, 2006.

LAIST, David W. et al. Collisions between ships and whales. **Marine Mammal Science**, v. 17, n. 1, p. 35-75, 2001.

LODI, Liliane; BOROBIA, Monica. **Baleias, Botos e Golfinhos do Brasil: guia de identificação**. Rio de Janeiro: Technical Books, 2013.

MACAULAY, Jamie Donald John. **Passive acoustic monitoring of harbour porpoise behaviour, distribution and density in tidal rapid habitats.** 2020. 273 f. Tese de Doutorado - University of St Andrews, Saint Andrews, 2018.

MACLEOD, Colin D. et al. Known and inferred distributions of beaked whale species (Cetacea: Ziphiidae). **Journal of Cetacean Research and Management**, v. 7, n. 3, p. 271, 2006.

MCCULLOUGH, Jennifer LK et al. Geographic distribution of the Cross Seamount beaked whale based on acoustic detections. **Marine Mammal Science**, v. 40, n. 1, p. 164-183, 2024.

MADSEN, Peter; WAHLBERG, Magnus; MØHL, Boris. Male sperm whale (*Physeter macrocephalus*) acoustics in a high-latitude habitat: implications for echolocation and communication. **Behavioral Ecology and Sociobiology**, v. 53, p. 31-41, 2002.

MADSEN, Peter Teglberg et al. Porpoise clicks from a sperm whale nose: Convergent evolution of 130 kHz pulses in toothed whale sonars? **Bioacoustics**, v. 15, n. 2, p. 195-206, 2005.

MALINKA, Chloe E. et al. Echolocation click parameters and biosonar behaviour of the dwarf sperm whale (*Kogia sima*). **Journal of Experimental Biology**, v. 224, n. 6, p. jeb240689, 2021.

MARTINS, Aline MA et al. The most northern record of Gervais' beaked whale, *Mesoplodon europaeus* (Gervais, 1855), for the Southern Hemisphere. **Latin American Journal of Aquatic Mammals**, p. 151-155, 2004.

MELCÓN, Mariana L.; FAILLA, Mauricio; IÑÍGUEZ, Miguel A. Echolocation behavior of franciscana dolphins (*Pontoporia blainvilliei*) in the wild. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 131, n. 6, p. EL448-EL453, 2012.

MERKENS, Karlina et al. Clicks of dwarf sperm whales (*Kogia sima*). **Marine Mammal Science**, v. 34, n. 4, p. 963-978, 2018.

MILLER, Patrick JO; JOHNSON, Mark P.; TYACK, Peter L. Sperm whale behaviour indicates the use of echolocation click buzzes 'creaks' in prey capture. **Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences**, v. 271, n. 1554, p. 2239-2247, 2004.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. Portaria MMA no 148/2022. **Lista Nacional de Espécies Ameaçadas de Extinção**. p.1-116, 2022.

MØHL, Bertel et al. Sperm whale clicks: Directionality and source level revisited. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 107, n. 1, p. 638-648, 2000.

MØHL, BERTEL, et al. The monopulsed nature of sperm whale clicks. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 114, n. 2, p. 1143-1154, 2003.

MOLINA-SCHILLER, D.; ROSALES, S. A.; FREITAS, T. R. O. Oceanographic conditions off coastal South America in relation to the distribution of Burmeister's porpoise, *Phocoena spinipinnis*. **Latin American Journal of Aquatic Mammals**, p. 141-156, 2005.

- MORISAKA, T.; CONNOR, R. C. Predation by killer whales (*Orcinus orca*) and the evolution of whistle loss and narrow-band high frequency clicks in odontocetes. **Journal of Evolutionary Biology**, v. 20, n. 4, p. 1439-1458, 2007.
- MOURA, Jailson F. et al. Stranding events of *Kogia* whales along the Brazilian coast. **PloS one**, v. 11, n. 1, p. e0146108, 2016.
- NOTARBARTOLO-DI-SCIARA, Giuseppe. Sperm whales, *Physeter macrocephalus*, in the Mediterranean Sea: a summary of status, threats, and conservation recommendations. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, v. 24, n. S1, p. 4-10, 2014.
- OLIVEIRA, Cláudia et al. Exposure to whale watching vessels affects dive ascents and resting behavior in sperm whales. **Frontiers in Marine Science**, v. 9, p. 914397, 2022.
- PAITACH, Renan L. et al. Echolocation variability of franciscana dolphins (*Pontoporia blainvilliei*) between estuarine and open-sea habitats, with insights into foraging patterns. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 150, n. 5, p. 3987-3998, 2021.
- PETROBRAS. **SIMBA - Sistema de Monitoramento da Biodiversidade Aquática: ocorrência individual de fauna**. 2017 Disponível em : <https://simba.petrobras.com.br/simba/web/sistema/pmp/1/individualfaunaoccurrence/33573>. 2017. Acesso em: 23 abr. 2023.
- PETROBRAS. **9º Relatório Anual do Projeto de Monitoramento de Cetáceos na Bacia de Santos (PMC-BS)**. Relatório técnico. Florianópolis: Socioambiental Consultores Associados, 2024. Disponível em: Projeto de Monitoramento de Cetáceos(PMC) | Comunica Bacia de Santos | Petrobras.
- PINEDO, Maria C. et al. Northernmost records of the spectacled porpoise, Layard's beaked whale, Commerson's dolphin, and Peale's dolphin in the southwestern. **Aquat. Mamm**, v. 28, p. 32-37, 2002.
- RUNTE, Kiersten L. et al. We Go Signaling Into the Night: Describing an Echolocation Signal of an Unknown Beaked Whale (Cetacea; Ziphiidae) off West Africa. **Marine Mammal Science**, p. e70002, 2025.
- REYES, Julio C.; MEAD, James G.; WAEREBEEK, Koen Van. A new species of beaked whale *Mesoplodon peruvianus* sp. (Cetacea: Ziphiidae) from Peru. **Marine mammal science**, v. 7, n. 1, p. 1-24, 1991.
- REYES REYES, María V. et al. Clicks of wild Burmeister's porpoises (*Phocoena spinipinnis*) in Tierra del Fuego, Argentina. **Marine Mammal Science**, v. 34, p. 1070-1081, 2018.
- SANTOS, Marcos César de Oliveira. A Gervais beaked whale (*Mesoplodon europaeus*) washed ashore in southeastern Brazil: extra limital record? **Aquatic Mammals**, v. 29, n. 3, p. 404-410, 2003.
- SANTOS, Mariana Soares et al. Rare sighting of Gervais' beaked whales in offshore waters of southeastern Brazil. **Journal of Cetacean Research and Management**, v. 25, p. 163-165, 2024.

SECCHI, E. R. et al. A synthesis of the ecology, human-related threats and conservation perspectives for the endangered Franciscana dolphin. **Frontiers in Marine Science**, v. 8, 2021.

SIMÕES-LOPES, Paulo C.; XIMENEZ, Aldredo. *Phocoena spinipinnis* Burmeister, 1865, na costa sul do Brasil (Cetacea-Phocoenidae). **Biotemas**, v. 2, n. 1, p. 83-89, 1989.

SOUZA, S. P. et al. A True's beaked whale (*Mesoplodon mirus*) on the coast of Brazil: adding a new beaked whale species to the Western Tropical Atlantic and South America. **Latin American Journal of aquatic mammals**, p. 129-136, 2005.

TELLECHEA, Javier S.; NORBIS, Walter. Sound characteristics of two neonatal franciscana dolphins (*Pontoporia blainvilliei*). **Marine Mammal Science**, v. 30, n. 4, p. 1573-1580, 2014.

TELLECHEA, Javier S.; FERREIRA, Marcelo; NORBIS, Walter. Echolocation and burst clicks from franciscana dolphins (*Pontoporia blainvilliei*) on the coast of Uruguay. **Marine Mammal Science**, v. 33, n. 2, 2017.

THOMPSON, Kirsten et al. The world's rarest whale. **Current Biology**, v. 22, n. 21, p. R905-R906, 2012

TRICKEY, Jennifer S. et al. Antarctic beaked whale echolocation signals near South Scotia Ridge. **Marine Mammal Science**, v. 31, n. 3, p. 1265-1274, 2015.

URICK, R. J. **Principles of Underwater Sound**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1983.

VISSEUR, Fleur et al. Sowerby's beaked whale biosonar and movement strategy indicate deep-sea foraging niche differentiation in mesoplodont whales. **Journal of Experimental Biology**, v. 225, n. 9, p. jeb243728, 2022.

WAHLBERG, Magnus. The acoustic behaviour of diving sperm whales observed with a hydrophone array. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, v. 281, n. 1-2, p. 53-62, 2002.

WAHLBERG, Magnus et al. Characteristics of biosonar signals from the northern bottlenose whale, *Hyperoodon ampullatus*. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 130, n. 5, p. 3077-3084, 2011.

WATKINS, William A. Acoustics and the behavior of sperm whales. In: **Animal sonar systems**. Boston, MA: Springer US, 1980. p. 283-290.

WHITEHEAD, Hal; WEILGART, Linda. Patterns of visually observable behaviour and vocalizations in groups of female sperm whales. **Behaviour**, p. 275-296, 1991.

YACK, Tina M. et al. Comparison of beaked whale detection algorithms. **Applied Acoustics**, v. 71, n. 11, p. 1043-1049, 2010.

YAMADA, Tadasu K. et al. Description of a new species of beaked whale (*Berardius*) found in the North Pacific. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 12723, 2019.

ZIMMER, Walter MX et al. Echolocation clicks of free-ranging Cuvier's beaked whales (*Ziphius cavirostris*). **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 117, n. 6, p. 3919-3927, 2005.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho desenvolveu e testou métodos para a detecção e classificação de vocalizações de cetáceos odontocetos do Atlântico Sul Ocidental. A tese baseou-se em um banco de dados de referência composto por gravações acústicas obtidas durante transectos realizados por embarcação, no contexto de amostragem acústico-visual de cetáceos na região da Bacia de Santos (PMC-BS/Petrobras). O esforço conjunto entre a amostragem visual e o monitoramento acústico passivo possibilitou o registro de diferentes grupos de espécies, revelando uma expressiva biodiversidade de odontocetos representativa da mastofauna marinha brasileira.

O classificador acústico de assovios desenvolvido para sete espécies de delfinídeos da Bacia de Santos demonstrou capacidade de discriminação apesar da grande sobreposição nas características acústicas previamente observada, um desafio significativo apontado também por estudos anteriores. Diante disso, a proposta metodológica desenvolvida neste trabalho buscou construir modelos robustos que considerassem tanto a diversidade de grupos amostrais, quanto o desbalanceamento natural observado nas coletas de campo. A abordagem adotada demonstrou-se eficaz para a maioria das espécies analisadas destacando o potencial do uso de técnicas de aprendizado de máquina na identificação de espécies por meio dos assovios. Apesar dos resultados promissores, o desempenho variável entre as espécies, em especial no caso de *Tursiops truncatus*, reforça a necessidade de aprimoramentos e aprofundamento da análise. Entre as contribuições do trabalho, destaca-se o desenvolvimento de uma estratégia de balanceamento que respeita a representatividade dos grupos, o uso criterioso de métricas de avaliação em cenários desbalanceados, e a exploração de diferentes configurações experimentais para garantir a robustez dos modelos. O fluxo de trabalho de processamento e classificação desenvolvido nesta tese, aplicável à predição de novos dados, permite o uso prático da metodologia. Os resultados destacam a utilidade das previsões baseadas em eventos acústicos e indicam que, para aplicações práticas, é necessário coletar pelo menos 20 a 30 assovios para assegurar desempenho consistente. Como limitação, ressalta-se a escassez de dados para algumas espécies, o que pode comprometer a generalização dos resultados. Nesse sentido, estudos futuros podem se beneficiar da ampliação da base de dados, inclusão de novas espécies, e da aplicação de

abordagens complementares de classificação, inclusive com foco em aspectos comportamentais e sociais das espécies.

Os modelos de classificadores acústicos de delfinídeos baseados em cliques de ecolocalização demonstraram menor poder discriminativo em comparação aos assovios. A dificuldade na classificação das espécies com base nos cliques pode estar relacionada às semelhanças morfológicas e ecológicas entre as espécies investigadas, que compartilham tamanho corporal, características anatômicas e nichos ecológicos semelhantes. Essas semelhanças podem levar à produção de cliques de ecolocalização com padrões similares, o que dificulta a discriminação das espécies. Ainda assim, o classificador de cliques se mostrou relevante por permitir a inclusão de espécies cuja detecção de assovios foi pouco registrada, e que, por isso, não puderam ser consideradas no classificador de assovios. Foi demonstrado que os modelos de classificação que integraram informações de assovios e cliques podem ser uma alternativa válida para a identificação de espécies, mesmo em situações em que se dispõe apenas de cliques ou assovios, ampliando assim a aplicabilidade prática da abordagem proposta. O classificador combinado foi treinado com um número reduzido de eventos acústicos por espécie, o que pode ter limitado seu desempenho, especialmente devido à maior variabilidade introduzida pelos cliques em comparação aos assovios. Observa-se, inclusive, que para determinadas espécies, a combinação de assovios e cliques resultou em acurácia similares, ou até inferiores, às obtidas com o uso exclusivo de assovios. Ainda assim, os resultados indicam que, com a ampliação da base de dados, esse modelo tem potencial para se tornar uma ferramenta robusta na identificação de espécies a partir de diferentes tipos de vocalizações. Por fim, foi apresentado um sistema de classificação baseado na integração de múltiplos modelos. O sistema consiste na agregação ponderada das probabilidades geradas por seis modelos base, considerando classificadores de assovios, cliques e modelos combinados. Os pesos atribuídos a cada modelo foram definidos com base em seu desempenho por espécie, favorecendo uma decisão final mais robusta e confiável.

No último capítulo, ampliou-se o rol de espécies de odontocetos detectadas e caracterizadas na região da Bacia de Santos, incluindo espécies elusivas, como os kogídeos e zifídeos, além dos cachalotes, espécie classificada como vulnerável devido às pressões históricas e aos impactos antrópicos atuais. As três famílias de

odontocetos descritas compartilham hábitos semelhantes, vivendo em áreas oceânicas e alimentando-se nas camadas meso e batipelágicas do oceano, podendo desempenhar um papel relevante na ciclagem de nutrientes. Com exceção do cachalote, tratam-se de espécies pouco conhecidas e de difícil observação em campo. Diante da crescente expansão das atividades humanas em ambientes offshore, torna-se essencial dedicar maior atenção a esses grupos. Também foi descrito de forma preliminar, os cliques tipo NBHF detectados em ambientes costeiros e atribuídos à família Pontoporiidae, cuja a única espécie é a toninha (*Pontoporia blainvilleana*). Embora a plataforma de coleta utilizada neste estudo não tenha sido ideal para a amostragem em águas costeiras, foi possível detectar e classificar cliques da toninha em algumas ocasiões, demonstrando o potencial de aplicação da metodologia em estudos ecológicos e em iniciativas de conservação desta espécie, atualmente em perigo de extinção.

No contexto do monitoramento acústico passivo, a capacidade de associar sinais acústicos a espécies específicas permite investigar aspectos como distribuição, abundância e comportamento, subsidiando ações de manejo e avaliação de impactos ambientais. O classificador acústico desenvolvido neste trabalho representa uma contribuição relevante nesse cenário, com aplicações no campo da biotecnologia ambiental, tal como em programas de monitoramento de cetáceos. A aplicação de detectores e classificadores automáticos mostrou-se viável e passível de replicação em diferentes contextos e projetos de monitoramento acústico passivo, configurando-se como uma ferramenta promissora para o avanço do conhecimento sobre a ecologia das espécies, bem como para ações de manejo e conservação. Nesse sentido, a abordagem proposta neste estudo alinha-se aos esforços voltados ao desenvolvimento de tecnologias que tornem o monitoramento acústico passivo mais eficiente e acessível, promovendo o conhecimento da biodiversidade marinha e contribuindo para sua conservação.

## REFERÊNCIAS

- AMORIM, Thiago O. S. et al. Integrative bioacoustics discrimination of eight delphinid species in the western South Atlantic Ocean. **PLoS One**, 14(6), e0217977, 2019.
- ANDRÉ, M. et al. Listening to the Deep: Live monitoring of ocean noise and cetacean acoustic signals. **Marine Pollution Bulletin**, v. 63, n. 1-4, p. 18-26, 2011.
- ANTICHI, Simone et al. Whistle structure variation between two sympatric dolphin species in the Gulf of California. **Hydrobiologia**, p. 1-14, 2024.
- AU, Whitlow W. **The sonar of dolphins**. New York: Springer-Verlag, 1993.
- AU, Whitlow WL; HASTINGS, Mardi C. **Principles of marine bioacoustics**. New York: Springer, 2008.
- AZZOLIN, M. et al. Combining whistle acoustic parameters to discriminate Mediterranean odontocetes during passive acoustic monitoring. **Journal of the Acoustic Society of America**, 135(1): 502-512, 2014.
- BARLOW, Jay; TAYLOR, Barbara L. Estimates of sperm whale abundance in the northeastern temperate Pacific from a combined acoustic and visual survey. **Marine Mammal Science**, v. 21, v.3, p.429-445, 2005.
- BAUMANN-PICKERING, Simone et al. Species-specific beaked whale echolocation signals. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 134, n. 3, p. 2293-2301, 2013.
- BAUMGARTNER, Mark F. et al. Real-time reporting of baleen whale passive acoustic detections from ocean gliders. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 134, n. 3, p. 1814-1823, 2013.
- BAUMGARTNER, Mark F. et al. Persistent near real-time passive acoustic monitoring for baleen whales from a moored buoy: System description and evaluation. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 10, n. 9, p. 1476-1489, 2019.
- BLOMQVIST, Christer; AMUNDIN, Mats. High-frequency burst-pulse sounds in agonistic/aggressive interactions in bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus*. In: **Echolocation in bats and dolphins**. Chicago: The University of Chicago Press, 2004, p. 425-431.
- BRANDINI, Frederico P.; TURA, Pedro M.; SANTOS, Pedro P.G.M. Ecosystem responses to biogeochemical fronts in the South Brazil Bight. **Progress in Oceanography**, v. 164, p. 52-62, 2018.
- BREIMAN, Leo. 2001. Random forests. **Machine learning**, v. 45, n. 1, p. 5-32, 2001.
- BREIMAN, Leo et al. **Classification and regression trees**. Wadsworth, Belmont, CA, 1984.
- CAMPOS, Edmo, J. D. et al. Physical Oceanography of the Southwest Atlantic Ocean. **Oceanography**, v. 8, n. 3, p. 87-91, 1995.

- CAUCHY, Pierre et al. Gliders for passive acoustic monitoring of the oceanic environment. **Frontiers in Remote Sensing**, v. 4, p. 1106533, 2023.
- COMMITTEE ON TAXONOMY. 2024. List of marine mammal species and subspecies. **Society for Marine Mammalogy**, [www.marinemammalscience.org](http://www.marinemammalscience.org), acessado em: 20/09/2024.
- DALPAZ, L. et al. Better together: analysis of integrated acoustic and visual methods when surveying a cetacean community. **Marine Ecology Progress Series**, v. 678, p. 197-209, 2021.
- DAVIS, Genevieve E. et al. Exploring movement patterns and changing distributions of baleen whales in the western North Atlantic using a decade of passive acoustic data. **Global Change Biology**, v. 26, n. 9, p. 4812-4840, 2020.
- EKAU, W.; KNOPPERS, B. A review and redefinition of the large marine ecosystems of Brazil. In: **Large Marine Ecosystems of the World—Trends in Exploitation, Protection and Research**. Amsterdam: Elsevier Science, 2003, p. 375-396.
- FERGUSON, Elizabeth L.; CLAYTON, Hannah M.; SAKAI, Taiki. Acoustic indices respond to specific marine mammal vocalizations and sources of anthropogenic noise. **Frontiers in Marine Science**, v. 10, p. 1025464, 2023.
- GIBB, Rory et al. Emerging opportunities and challenges for passive acoustics in ecological assessment and monitoring. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 10, n. 2, p. 169-185, 2019.
- GILLESPIE, Douglas et al. PAMGuard: Semiautomated, opensource software for real-time acoustic detection and localisation of cetaceans. **Proceedings of the Institute of Acoustics**, v.30, n.5, 2008.
- GILLESPIE, Douglas, et al. Automatic detection and classification of odontocete whistles. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 134, n. 3, p. 2427-2437, 2013.
- GRIFFITHS, Emily T.; BARLOW, Jay. Cetacean acoustic detections from free-floating vertical hydrophone arrays in the southern California Current. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 140, n. 5, p. EL399–EL404, 2016.
- GROSE, S. O. et al. Climate change will re-draw the map for marine megafauna and the people who depend on them. **Frontiers in Marine Science**, v. 7, p. 547, 2020.
- HILDEBRAND, John A. et al. Passive acoustic monitoring of beaked whale densities in the Gulf of Mexico. **Scientific Reports**, v. 5, n. 1, p. 16343, 2015.
- HILDEBRAND, John A. et al. Assessing seasonality and density from passive acoustic monitoring of signals presumed to be from pygmy and dwarf sperm whales in the Gulf of Mexico. **Frontiers in Marine Science**, v. 6, p. 66, 2019.
- HODGE, Lynne E.W. et al. Heard but not seen: Occurrence of *Kogia* spp. along the western North Atlantic shelf break. **Marine Mammal Scince**., v. 34, n. 4, p. 1141-1153, 2018.

JACOBS, Ellen R. et al. The active space of sperm whale codas: inter-click information for intra-unit communication. **Journal of Experimental Biology**, v. 227, n. 4, p. jeb246442, 2024.

JANIK, Vincent M. **Acoustic communication in delphinids**. In: Advances in the Study of Behavior. [S.I.], Academic Press, 2009, v40, Cap. 4, p. 123-157.

JANIK, Vincent M.; SAYIGH, Laela S.; WELLS, Randall S. Signature whistle shape conveys identity information to bottlenose dolphins. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 103, n. 21, p. 8293-8297, 2006.

JOHNSON, Mark et al. Beaked whales echolocate on prey. **Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences**, v. 271, n. suppl\_6, p. S383-S386, 2004.

LADICH, Friedrich; WINKLER, Hans. Acoustic communication in terrestrial and aquatic vertebrates. **Journal of Experimental Biology**, v.220, n. 13, p. 2306-231, 2017.

LADICH, Friedrich. Ecology of sound communication in fishes. **Fish and Fisheries**, v. 20, n. 3, p. 552-563, 2019.

LAMMERS, M. O. et al. A comparative analysis of echolocation and burst-pulse click trains in *Stenella longirostris*. In: **Echolocation in bats and dolphins**, Chicago: The University of Chicago Press, 2004, p. 414-419.

LAMMERS, Marc O.; SCHOTTEN, Michiel; AU, Whitlow WL. The spatial context of free-ranging Hawaiian spinner dolphins (*Stenella longirostris*) producing acoustic signals. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 119, n. 2, p. 1244-1250, 2006.

LIMA, Isabela et al. Whistle comparison of four delphinid species in Southeastern Brazil. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 139, n. 5, p. EL124-EL127, 2016.

LODI, Liliane; BOROBIA, Monica. **Baleias, Botos e Golfinhos do Brasil: guia de identificação**. Rio de Janeiro: Technical Books, 2013.

LUÍS, A. R. et al. Vocal universals and geographic variations in the acoustic repertoire of the common bottlenose dolphin. **Scientific Reports**, v. 11, n. 11847, 2021.

MADSEN, Peter; WAHLBERG, Magnus; MØHL, Boris. Male sperm whale (*Physeter macrocephalus*) acoustics in a high-latitude habitat: implications for echolocation and communication. **Behavioral Ecology and Sociobiology**, v. 53, p. 31-41, 2002.

MADSEN, Peter Teglberg et al. Porpoise clicks from a sperm whale nose: Convergent evolution of 130 kHz pulses in toothed whale sonars? **Bioacoustics**, v. 15, n. 2, p. 195-206, 2005.

MADSEN, P. T.; SURLYKKE, Annemarie. Functional convergence in bat and toothed whale biosonars. **Physiology**, v. 28, n. 5, p. 276-283, 2013.

MALINKA, Chloe E. et al. Echolocation click parameters and biosonar behaviour of the dwarf sperm whale (*Kogia sima*). **Journal of Experimental Biology**, v. 224, n. 6, p. jeb240689, 2021.

- MARQUES, Tiago A. et al. Estimating animal population density using passive acoustics. **Biological Reviews**, v. 88, n. 2, p. 287-309, 2013.
- MATTHEWS, J. N. et al. A review of frequency and time parameters of cetacean tonal calls. **Bioacoustics**, v. 10, n. 1, p. 47-71, 1999.
- MCCULLOUGH, Jennifer LK et al. An acoustic survey of beaked whales and Kogia spp. in the Mariana Archipelago using drifting recorders. **Frontiers in Marine Science**, v. 8, p. 664292, 2021.
- MELLINGER, David K. et al. An overview of fixed passive acoustic observation methods for cetaceans. **Oceanography**, v.20, n. 4, p. 36-45, 2007.
- MELLINGER, David K., 2001. Ishmael 1.0 User's Guide. **NOAA Technical Memorandum OAR PMEL-120**, available from NOAA/PMEL/OERD, 2115 SE OSU Drive, Newport, OR 97365-5258.
- MILLER, Patrick JO; JOHNSON, Mark P.; TYACK, Peter L. Sperm whale behaviour indicates the use of echolocation click buzzes 'creaks' in prey capture. **Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences**, v. 271, n. 1554, p. 2239-2247, 2004.
- MILLER, Brian S.; MILLER, Elanor J. The seasonal occupancy and diel behaviour of Antarctic sperm whales revealed by acoustic monitoring. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 5429, 2018.
- MILLER, Brian S. et al. Antarctic sonobuoy surveys for blue whales from 2006-2021 reveal contemporary distribution, changes over time, and paths to further our understanding of their distribution and biology. **Frontiers in Marine Science**, v. 11, p. 1324816, 2024.
- MMA. Ministério do Meio Ambiente. Portaria MMA no 148/2022. **Lista Nacional de Espécies Ameaçadas de Extinção**. p.1-116, 2022.
- MØHL, BERTEL, et al. The monopulsed nature of sperm whale clicks. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 114, n. 2, p. 1143-1154, 2003.
- MONTGOMERY, John C.; RADFORD, Craig A. Marine bioacoustics. **Current Biology**, v. 27, n. 11, p. R502-R507, 2017.
- MOREIRA, Daniel L. et al. Multidisciplinary scientific cruises for environmental characterization in the Santos Basin - Methods and sampling design. **Ocean and Coastal Research**, v. 71, e23022, 2023.
- NORRIS, Thomas F. et al. Estimation of minke whale abundance from an acoustic line transect survey of the Mariana Islands. **Marine Mammal Science**, v. 33, n. 2, p. 574-592, 2017.
- OLIVEIRA, Cláudia et al. The function of male sperm whale slow clicks in a high latitude habitat: Communication, echolocation, or prey debilitation? **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 133, n. 5, p. 3135-3144, 2013.

OSWALD, Julie N.; BARLOW, Jay; NORRIS, Thomas F. Acoustic identification of nine delphinid species in the eastern tropical Pacific Ocean. **Marine Mammal Science**, v. 19, n. 1, p. 20-37, 2003.

OSWALD, Julie N. et al. A tool for real-time acoustic species identification of delphinid whistles. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 122, n. 1, p. 587-595, 2007.

OSWALD, Julie N.; RANKIN, Shannon; BARLOW, Jay. To whistle or not to whistle? Geographic variation in the whistling behavior of small odontocetes. **Aquatic Mammals**, v. 34, n. 3, p. 288-302, 2008.

OSWALD, Julie N. et al. Species information in whistle frequency modulation patterns of common dolphins. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**. V. 376, n. 1836, p. 20210046, 2021.

OSWALD, Julie N. et al. Detection and classification methods for animal sounds. In: **Exploring animal behavior through sound**, Springer Nature v. 1, 2022, Cap.8, p. 269-317.

PAPALE, Elena et al. Geographic variability in the acoustic parameters of striped dolphin's (*Stenella coeruleoalba*) whistles. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v.133, n. 2, p.1126-1134, 2013.

PEDREGOSA, Fabian et al. Scikit-learn: Machine learning in Python. **The Journal of Machine Learning Research**, v. 12, p. 2825-2830, 2011.

POPPER, Arthur N.; HAWKINS, Anthony D. An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes. **Journal of Fish Biology**, v. 94, n. 5, p. 692-713, 2019.

PUTLAND, R. L.; CONSTANTINE, Rochelle; RADFORD, C. A. Exploring spatial and temporal trends in the soundscape of an ecologically significant embayment. **Scientific reports**, v. 7, n. 1, p. 5713, 2017.

REGE-COLT, Manali et al. Whistle repertoire and structure reflect ecotype distinction of pantropical spotted dolphins in the Eastern Tropical Pacific. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 13449, 2023.

RENDELL, Luke. E. et al. Quantitative analysis of tonal calls from five odontocete species, examining interspecific and intraspecific variation. **Journal of Zoology** 249:403-410, 1999.

SMOLKER, R A; MANN, J; SMUTS, B B. Use of signature whistles during separations and reunions by wild bottlenose dolphin mothers and infants. **Behavioral Ecology and Sociobiology**, v.33, p. 393-402, 1993.

SOUTHALL, Brandon L, et al. Managing human activity and marine mammals: A biologically based, relativistic risk assessment framework. **Frontiers in Marine Science**, v. 10, p. 1090132, 2023.

TYACK, Peter L Population biology, social behavior and communication in whales and dolphins. **Trends in ecology & evolution**, v. 1, n. 6, p. 144-150, 1986.

- TYACK, Peter L; CLARK, Christopher W. Communication and acoustic behavior of dolphins and whales. *In: Hearing by whales and dolphins*. New York: Springer, 2000, p. 156-224.
- TYACK, Peter L. Functional aspects of cetacean communication. *In: Cetacean societies: Field studies of dolphins and whales*. Chicago: Chicago Press, 2000, p. 270-307.
- TYACK, Peter L; MILLER, Edward H. Vocal anatomy, acoustic communication and echolocation. *In: Marine mammal biology: An evolutionary approach*. Oxford: Blackwell Science, 2002, Cap. 6, p. 142-184.
- TYACK, Peter L. et al. Extreme diving of beaked whales. *Journal of Experimental Biology*, v. 209, n. 21, p. 4238-4253, 2006.
- TYACK, Peter L. Marine mammal acoustic behavior. *Acoustics Today*, v. 13, n. 2, p. 44-51, 2017.
- URICK, R. J. **Principles of Underwater Sound**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1983.
- VAN OPZEELAND, I.; HILLEBRAND, H. Year-round passive acoustic data reveal spatiotemporal patterns in marine mammal community composition in the Weddell Sea, Antarctica. *Marine Ecology Progress Series*, v. 638, p. 191–206, 2020.
- VAN PARIJS, Sofie M. et al. Management and research applications of real-time and archival passive acoustic sensors over varying temporal and spatial scales. *Marine Ecology Progress Series*, v. 395, p. 21-36, 2009.
- WATWOOD, Stephanie L. et al. Deep-diving foraging behaviour of sperm whales (*Physeter macrocephalus*). *Journal of Animal Ecology*, v. 75, n. 3, p. 814-825, 2006.
- YACK, Tina M. et al. Passive acoustic monitoring using a towed hydrophone array results in identification of a previously unknown beaked whale habitat. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 134, n. 3, p. 2589-2595, 2013.
- ZIMMER, Walter MX. **Passive acoustic monitoring of cetaceans**. Cambridge University Press, 2011.

## APÊNDICE A - VARIÁVEIS DESCRIPTORAS DOS ASSOVIOS

<b>Abreviação</b>	<b>Descrição da variável</b>
FREQMAX	Frequência máxima (Hz)
FREQMIN	Frequência mínima (Hz)
DURATION	Duração (s)
FREQBEG	Frequência inicial (Hz)
FREQEND	Frequência final (Hz)
FREQRANGE	(Frequência máxima) – (Frequência mínima) (Hz)
FREQMEAN	Frequência média (Hz)
FREQSTDDEV	Desvio padrão da frequência (Hz)
FREQMEDIAN	Frequência mediana (Hz)
FREQCENTER	(Frequência mínima) + (frequência máxima-frequência mínima) / 2 (Hz)
FREQRELBW	(frequência máxima – frequência mínima) / frequência central
FREQMAXMINRATIO	Frequência máxima / frequência mínima
FREQBEGENDRATIO	Frequência inicial / frequência final
FREQQUARTER1	Frequência em ¼ da duração (Hz)
FREQQUARTER2	Frequência na metade da duração (Hz)
FREQQUARTER3	Frequência em ¾ da duração (Hz)
FREQSPREAD	Diferença entre os percentis de frequência em 75% e 25%
FREQCOFM	Coeficiente da modulação de frequência: 20 medições de frequência igualmente espaçadas no tempo. Cada valor de frequência é subtraído pelo anterior. COMF é a soma dos valores absolutos dessas diferenças, todas divididas por 10.000
FREQSTEPUP	Número de degraus com frequência ascendente
FREQSTEPDOWN	Número de degraus com frequência descendente
FREQNUMSTEPS	Número de degraus (10% ou mais do aumento ou diminuição da frequência entre dois pontos
FREQSLOPEMEAN	Média total da inclinação (Hz/s)
FREQABSSLOPEMEAN	Média absoluta da inclinação (Hz/s)
FREQPOSSLOPEMEAN	Tempo médio entre pontos de inflexão (s)
FREQNEGSSLOPEMEAN	Desvio padrão - duração entre pontos de inflexão (s)
FREQSLOPERATIO	Mediana do tempo entre pontos de inflexão (s)
FREQSTEPUP	Média total da inclinação (Hz/s)
FREQSTEPDOWN	Média da inclinação positiva (Hz/s)

<b>Abreviação</b>	<b>Descrição da variável</b>
FREQNUMSTEPS	Número de degraus (10% ou mais do aumento ou diminuição da frequência entre dois pontos Média da inclinação negativa (Hz/s)
FREQSLOPEMEAN	Média absoluta da inclinação (Hz/s)
FREQABSSLOPEMEAN	Inclinação positiva/média da inclinação negativa
FREQPOSSLOPEMEAN	Média da inclinação positiva (Hz/s)
FREQNEGSLOPEMEAN	Média da inclinação negativa (Hz/s)
FREQSLOPERATIO	Inclinação positiva/média da inclinação negativa
NUMSWEEPUPDWN	Número de vezes entre modulação positiva e negativa
NUMSWEEPDOWNUP	Número de vezes entre modulação negativa para positiva
NUMSWEEPUPFLAT	Número de vezes entre modulação positiva para neutra
NUMSWEEPDOWNFLAT	Número de vezes entre modulação negativa para neutra
NUMSWEEPSFLATUP	Número de vezes entre modulação neutra para positiva
NUMSWEEPSFLATDWN	Número de vezes entre modulação neutra para negativa
FREQSWEEPUPPERCENT	Percentual dos assobios com modulação positiva
FREQSWEEPDOWNPERCENT	Percentual dos assobios com modulação negativa
FREQSWEEPFLATPERCENT	Percentual dos assobios com modulação neutra
NUMINFLLECTIONS	Número de pontos de inflexão (mudança na modulação de positivo para negativo ou negativo para positivo)
INFLMAXDELTA	Duração máxima entre dois pontos de inflexão (s)
INFLMINDELTA	Duração mínima entre dois pontos de inflexão (s)
INFLMAXMINDELTA	Delta máximo / delta mínimo
INFLMEANDELTA	Duração média entre pontos de inflexão (s)
INFLSTDDEVDELTA	Desvio padrão da duração entre pontos de inflexão (s)
INFLMEDIANDELTA	Mediana do tempo entre pontos de inflexão (s)
INFLDUR	Número de pontos de inflexão/duração
STEPDUR	Número de degraus/duração

## APÊNDICE B - PRINCIPAIS PARÂMETROS ACÚSTICOS DOS ASSOVIOS DE ESPÉCIES DE GOLFINHOS DA BACIA DE SANTOS

Valores da média em negrito, seguido do desvio padrão e os valores mínimo e máximo entre parênteses.

<b>Espécie</b>	<b>Freq. Inicial (kHz)</b>	<b>Freq. Final (kHz)</b>	<b>Freq. Mínima (kHz)</b>	<b>Freq. Máxima (kHz)</b>	<b>Freq. Média (kHz)</b>	<b>Delta Freq. (kHz)</b>	<b>Duração (s)</b>	<b>Número Pontos Inflexão</b>
<i>Delphinus delphis</i> (n = 230)	<b>12,0</b> ± 4,0 (5,3 - 35,2)	<b>13,0</b> ± 3,5 (5,2 - 29,8)	<b>9,2</b> ± 1,7 (5,1 - 12,5)	<b>15,6</b> ± 3,5 (8,9 - 35,5)	<b>11,6</b> ± 1,7 (6,7 - 18,0)	<b>6,4</b> ± 3,4 (1,4 - 26,6)	<b>0,87</b> ± 0,4 (0,07 - 2,8)	<b>2,6</b> ± 1,9 (0 - 10)
<i>Stenella attenuata</i> (n = 378)	<b>11,0</b> ± 3,6 (4,5 - 25,2)	<b>14,2</b> ± 4,8 (6,0 - 26,6)	<b>9,4</b> ± 2,3 (4,5 - 20,2)	<b>18,8</b> ± 3,7 (7,3 - 31,3)	<b>13,8</b> ± 2,3 (6,6 - 24,1)	<b>9,5</b> ± 3,9 (0,6 - 23,6)	<b>0,83</b> ± 0,4 (0,05 - 2,9)	<b>2,4</b> ± 2,2 (0 - 13)
<i>Steno bredanensis</i> (n = 139)	<b>7,7</b> ± 2,6 (4,2 - 18,6)	<b>8,8</b> ± 3,2 (4,9 - 19,5)	<b>6,8</b> ± 1,4 (3,9 - 11,1)	<b>9,3</b> ± 3,2 (5,3 - 19,5)	<b>8,0</b> ± 1,9 (5,0 - 12,9)	<b>2,5</b> ± 3,4 (0 - 10,4)	<b>0,51</b> ± 0,3 (0,10 - 1,8)	<b>3,0</b> ± 2,3 (0 - 11)
<i>Stenella clymene</i> (n = 435)	<b>13,1</b> ± 3,3 (4,2 - 23,4)	<b>12,5</b> ± 3,7 (4,0 - 24,8)	<b>10,5</b> ± 2,3 (4,0 - 18,7)	<b>17,5</b> ± 3,6 (6,7 - 27,1)	<b>14,2</b> ± 2,6 (6,3 - 20,9)	<b>6,9</b> ± 3,3 (0,4 - 18,8)	<b>1,13</b> ± 0,5 (0,15 - 3,2)	<b>5,2</b> ± 3,2 (0 - 23)
<i>Stenella frontalis</i> (n = 1767)	<b>9,2</b> ± 2,9 (3,5 - 24,7)	<b>14,5</b> ± 3,9 (4,1 - 32,2)	<b>8,1</b> ± 2,0 (3,4 - 18,5)	<b>16,8</b> ± 3,3 (6,0 - 32,2)	<b>12,0</b> ± 2,0 (5,7 - 21,9)	<b>8,7</b> ± 3,6 (0,2 - 22,4)	<b>0,78</b> ± 0,4 (0,07 - 3,0)	<b>3,7</b> ± 2,6 (0 - 21)
<i>Stenella longirostris</i> (n = 847)	<b>12,3</b> ± 4,6 (3,7 - 37,0)	<b>14,3</b> ± 4,4 (5,0 - 32,3)	<b>10,0</b> ± 2,4 (3,7 - 24,4)	<b>17,6</b> ± 3,7 (7,0 - 37,0)	<b>13,8</b> ± 2,5 (6,2 - 26,9)	<b>7,7</b> ± 3,4 (0,2 - 19,7)	<b>1,14</b> ± 0,4 (0,11 - 3,0)	<b>3,1</b> ± 2,7 (0 - 21)
<i>Tursiops truncatus</i> (n = 826)	<b>11,8</b> ± 4,8 (4,0 - 28,9)	<b>12,2</b> ± 4,2 (4,4 - 25,6)	<b>8,7</b> ± 2,2 (4,0 - 17,2)	<b>16,1</b> ± 4,1 (6,0 - 28,9)	<b>12,3</b> ± 2,5 (5,7 - 19,3)	<b>7,4</b> ± 3,8 (0,1 - 20,2)	<b>1,01</b> ± 0,6 (0,10 - 6,0)	<b>3,1</b> ± 3,4 (0 - 57)

## APÊNDICE C – VARIÁVEIS DESCRIPTORAS DOS CLIQUES

<b>Abreviação</b>	<b>Descrição da variável</b>
ici	intervalo-entre-os cliques (s)
duration	duração ( $\mu$ s)
peak	pico máximo de frequência (kHz)
peak2	segundo pico de frequência (kHz)
peak3	terceiro pico de frequência (kHz)
trough	vale entre os picos máximo e pico (kHz)
trough2	vale entre os picos 2 e pico 3 (kHz)
peakToPeak2	Diferença entre o pico máximo e pico 2 (kHz)
peakToPeak3	Diferença entre o pico máximo e pico 3 (kHz)
peak2ToPeak3	Diferença entre o pico 2 e pico 3 (kHz)
Q_10dB	Fator de Qualidade de Ressonância em -10dB
fmin_10dB	Limite inferior da banda de -10 dB (kHz)
fmax_10dB	Limite superior da banda de -10 dB (kHz)
BW_10dB	Largura da banda em -10dB (kHz)
centerkHz_10dB	Frequência central em -10 dB (kHz)
Q_3dB	Fator de Qualidade de Ressonância em -3dB
fmin_3dB	Limite inferior da banda de -3 dB (kHz)
fmax_3dB	Limite superior da banda de -3 dB (kHz)
BW_3dB	Largura da banda em -3dB (kHz)
centerkHz_3dB	Frequência central em -3 dB (kHz)

## APÊNDICE D - PRINCIPAIS PARÂMETROS ACÚSTICOS DOS CLIQUES DE ESPÉCIES DE GOLFINHOS DA BACIA DE SANTOS

Valores da média em negrito, seguido do desvio padrão e os valores mínimo e máximo entre parênteses.

Espécie	Freq. Pico (kHz)	Largura Banda -3 dB (kHz)	Largura Banda -10 dB (kHz)	Fator Q -3 dB (kHz)	Fator Q -10 dB (kHz)	Duração (μs)	Intervalo-entre-cliques (ms)
<i>Delphinus delphis</i> (n = 4.115)	<b>47,1</b> ± 12,4 (11,7 - 79,1)	<b>5,6</b> ± 6,0 (0,30 - 43,8)	<b>22,6</b> ± 16,1 (1,1 - 75,0)	<b>20,6</b> ± 21,1 (0,9 - 235)	<b>5,0</b> ± 6,6 (0,3 - 59,2)	<b>245</b> ± 414 (2 - 1998)	<b>102</b> ± 68 (3 - 386)
<i>Grampus griesus</i> (n = 8.976)	<b>45,6</b> ± 10,8 (12,2 - 98,6)	<b>5,2</b> ± 5,3 (0,20 - 48,1)	<b>19,2</b> ± 13,7 (0,7 - 77,5)	<b>17,4</b> ± 17,5 (1,1 - 320)	<b>4,5</b> ± 5,1 (0,6 - 96,0)	<b>423</b> ± 524 (2 - 2000)	<b>131</b> ± 104 (3 - 481)
<i>Globicephala</i> sp. (n = 2.199)	<b>38,8</b> ± 12,6 (12,7 - 75,2)	<b>7,0</b> ± 6,8 (0,20 - 42,3)	<b>23,5</b> ± 15,0 (0,6 - 75,4)	<b>12,4</b> ± 16,2 (0,7 - 290)	<b>2,8</b> ± 4,1 (0,4 - 87,0)	<b>315</b> ± 533 (2 - 2000)	<b>166</b> ± 82 (8 - 462)
<i>Stenella attenuata</i> (n = 8.733)	<b>42,9</b> ± 13,9 (10,0 - 99,6)	<b>6,0</b> ± 5,7 (0,30 - 40,4)	<b>19,5</b> ± 14,0 (0,8 - 99,6)	<b>15,4</b> ± 15,8 (1,0 - 175)	<b>4,1</b> ± 4,9 (0,4 - 71,4)	<b>498</b> ± 615 (2 - 2000)	<b>110</b> ± 63 (3 - 380)
<i>Steno bredanensis</i> (n = 7.895)	<b>37,6</b> ± 12,2 (10,7 - 88,4)	<b>7,5</b> ± 7,6 (0,30 - 53,2)	<b>22,7</b> ± 15,1 (1,0 - 83,8)	<b>11,5</b> ± 14,2 (0,7 - 236)	<b>2,9</b> ± 4,1 (0,4 - 63,2)	<b>318</b> ± 480 (2 - 2000)	<b>124</b> ± 71 (5 - 458)
<i>Stenella clymene</i> (n = 7.219)	<b>39,8</b> ± 12,3 (10,7 - 88,9)	<b>7,0</b> ± 6,3 (0,30 - 55,2)	<b>23,4</b> ± 14,6 (1,0 - 75,0)	<b>13,0</b> ± 16,6 (1,0 - 226)	<b>3,1</b> ± 4,4 (0,4 - 62,3)	<b>323</b> ± 469 (2 - 2000)	<b>122</b> ± 60 (5 - 409)
<i>Stenella frontalis</i> (n = 57.459)	<b>45,5</b> ± 12,5 (10,3 - 93,3)	<b>8,1</b> ± 6,7 (0,10 - 52,0)	<b>23,5</b> ± 14,3 (0,3 - 88,7)	<b>13,7</b> ± 19,2 (0,8 - 352)	<b>3,3</b> ± 4,7 (0,3 - 105)	<b>633</b> ± 686 (2 - 2000)	<b>81</b> ± 65 (2 - 483)
<i>Stenella longirostris</i> (n = 23.061)	<b>42,7</b> ± 12,8 (10,7 - 87,9)	<b>6,3</b> ± 6,5 (0,20 - 49,9)	<b>22,5</b> ± 15,3 (0,8 - 78,3)	<b>15,0</b> ± 14,8 (0,8 - 252)	<b>3,8</b> ± 4,7 (0,3 - 75,7)	<b>268</b> ± 427 (2 - 2000)	<b>99</b> ± 65 (3 - 431)
<i>Tursiops truncatus</i> (n = 32.016)	<b>42,6</b> ± 12,9 (10,3 - 84,5)	<b>7,2</b> ± 6,0 (0,20 - 49,4)	<b>22,2</b> ± 13,8 (0,5 - 85,0)	<b>12,6</b> ± 16,1 (0,7 - 323)	<b>3,2</b> ± 4,0 (0,3 - 96,9)	<b>528</b> ± 620 (2 - 2000)	<b>74</b> ± 50 (2 - 387)