

**DIVERSIDADE ACÚSTICA E DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DE
TELEÓSTEOS NA BAÍA DO FLAMENGO, UBATUBA, SÃO
PAULO**

LUIZA ROSSATO PEREIRA

**SÃO VICENTE
2024**

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”

INSTITUTO DE BIOCIÊNCIAS - CÂMPUS DO LITORAL PAULISTA

DIVERSIDADE ACÚSTICA E DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DE
TELEÓSTEOS NA BAÍA DO FLAMENGO, UBATUBA, SÃO
PAULO

LUIZA ROSSATO PEREIRA

MARIO MANOEL ROLLO JR

Dissertação apresentada ao Instituto de Biociências,
Câmpus do Litoral Paulista, UNESP, para obtenção
do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Biodiversidade de Ambientes
Costeiros.

SÃO VICENTE
2024

P436d

Pereira, Luiza Rossato

DIVERSIDADE ACÚSTICA E DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL
DE TELEÓSTEOS NA BAÍA DO FLAMENGO, UBATUBA, SÃO
PAULO / Luiza Rossato Pereira. -- São Vicente, 2024

52 p. : tabs., mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Instituto de Biociências, São Vicente

Orientador: Mario Manoel Rollo Jr

1. Bioacústica. 2. Biodiversidade. 3. Ubatuba. 4. Diversidade
Acústica. 5. Teleósteos. I. Título.

Agradecimentos

Muitas pessoas passaram na minha vida durante esses dois anos, contribuíram para que esse projeto fosse concluído, e merecem parte dos meus agradecimentos, mas o meu orientador, professor Mario, é quem merece o primeiro lugar. Agradeço imensamente pelo apoio, confiança, aprendizado, ensinamento e paciência. Tenho certeza que escolhi o melhor para me guiar durante os anos de graduação e pós graduação. Agradeço pela melhor orientação de todas, por me acalmar em momentos desafiadores, por encontrar soluções onde eu só via problemas, e por acreditar em mim. Obrigada por tudo, mais uma vez, professor.

Se não fosse meu pai, meus irmãos, Rafael e Vitória, minha melhor amiga Letícia, e meu amigo João Pedro, diretamente de Ubatuba, esse projeto também não seria concluído. Eles colocaram a mão na massa e foram fundamentais nos campos e nas coletas de dados. Agradeço ao João por mergulhar comigo no frio do inverno de 2022 e também pelos outros mergulhos que ele fez em busca do AudioMoth enquanto eu estava alguns quilômetros distantes de Ubatuba. Agradecimento mais que especial para a Letícia, e para a minha irmã, por terem feito uma bela dupla e terem resgatado o AudioMoth, no verão. Um muito obrigada para o meu irmão, ou melhor, para o “ir”, por ter recuperado o AudioMoth, quando achávamos que ele tinha sido perdido para sempre...

Agradeço aos meus pais, Alexandre e Rosângela. Ao meu pai por me acompanhar em quase todas as viagens para Ubatuba, por todos os mergulhos no ponto de coleta e principalmente por estar comigo em todos os momentos, desde sempre. Papi, você é o MAIOR! Mãe é mãe, não tem como agradecer em algumas palavras, agradeço pelo fato dela existir, por ela ser mil em uma, por ser exatamente do jeitinho dela e pelo apoio de sempre.

Aos meus pais, irmã e irmão, quero dizer muito obrigada por serem minha base e contribuírem para minha formação ao longo de todos esse anos. Não existe amor maior no mundo do que o meu para vocês.

Resumo

Vários processos seletivos afetaram os mecanismos de comunicação entre peixes ósseos, com destaque para a produção de sons. Esses sons, que podem ser pulsos isolados, sequências de pulsos ou sons tonais, estão relacionados a uma variedade de comportamentos, como cortejo, desova, alimentação e proteção contra predadores, além de estarem associados à formação de grupos que caracterizam eventos sonoros conhecidos como coros de peixes. O objetivo principal deste estudo foi caracterizar a diversidade acústica das espécies de peixes teleósteos na Baía do Flamengo, em Ubatuba, utilizando métodos de pesquisa não invasivos. A coleta de dados foi realizada na Baía do Flamengo, Ubatuba, no litoral norte do estado de São Paulo, onde os sons foram registrados por um dispositivo de gravação autônomo (AudioMoth v1.2.0) submerso a cerca de 1 m de profundidade. Os dados coletados ao longo das quatro estações do ano foram analisados por meio de escuta e avaliação visual, utilizando o programa Raven Pro 1.6.5. Em seguida, foram calculados os índices de diversidade acústica (ACI e H), e os parâmetros medidos foram comparados usando os testes de Kruskal-Wallis para comparação múltipla não-paramétrica e o pós teste de Dunn. Foram avaliadas 5900 amostras de sinais acústicos, agrupadas em 22 frequências dominantes. Os resultados indicaram maior atividade dos animais no verão, com uma média mais alta dos valores de H nessa estação, enquanto os valores médios de ACI foram mais elevados no inverno, sendo o valor máximo observado durante a noite dessa estação. As diferenças sazonais nas emissões de sons podem ser influenciadas pela temperatura da água e pelo ciclo lunar.

Palavra chaves: bioacústica; biodiversidade; Ubatuba; diversidade acústica; teleósteos

Abstract

Several selected processes affected the communication mechanisms between bony fish, with emphasis on the production of sounds. These sounds, which can be isolated pulses, sequences of pulses or tonal sounds, are related to a variety of behaviors, such as courtship, spawning, feeding and protection against predators, in addition to being associated with the formation of groups that characterize sound events known as choruses. of fish. The main objective of this study was to characterize the acoustic diversity of teleost fish species in Flamengo Bay, in Ubatuba, using non-invasive research methods. Data collection was carried out in Flamengo Bay, Ubatuba, on the north coast of the state of São Paulo, where sounds were recorded by an autonomous recording device (AudioMoth v1.2.0) submerged at a depth of approximately 1 m. The data collected throughout the four seasons of the year were analyzed through listening and visual evaluation, using the Raven Pro 1.6.5 program. Then, the acoustic diversity indices (ACI and H) were calculated, and the measured parameters were compared using the Kruskal-Wallis test for non-parametric multiple comparison and Dunn's post test. 5900 samples of acoustic signals were evaluated, grouped into 22 dominant frequencies. The results indicated greater activity of the animals in summer, with a higher average of H values in this season, while the average ACI values were higher in winter, with the maximum value observed during the night in that season. Seasonal differences in sound emissions can be influenced by water temperature and the lunar cycle.

Keywords: bioacoustics; biodiversity; Ubatuba; acoustic diversity; teleosts

Sumário

1. Introdução	1
2. Objetivos	7
3. Metodologia	7
3.1 Área de Estudo	7
3.2 Coleta de dados	8
3.3. Análise Acústica	9
4. Resultados e discussão	12
4.1. Avaliação da capacidade de emissão de sons pelas espéciesde teleósteos já registradas na Baía do Flamengo	12
4.2. Identificação dos sinais e repertórios acústicos	13
4.3. Análise da distribuição temporal dos sons dos teleósteos	18
4.4. Avaliação da biodiversidade através do uso de índices acústicos	24
4.5. Divulgação dos dados através de uma biblioteca digital	33
5. Considerações Finais.....	34
6. Literatura citada	36

1. Introdução

Os assim chamados peixes ósseos (Teleostei, Actinopterygii) representam o maior e mais diverso grupo de vertebrados existente, com aproximadamente 27.000 espécies, distribuídas em 40 ordens, 448 famílias e 4.278 gêneros. Esses números equivalem a cerca de 96% de todos os peixes existentes nos dias atuais. O seu esqueleto ósseo, principalmente na região na cauda, com a função de suporte aos raios da nadadeira caudal é a principal característica que os une. Eles apresentam uma ampla gama de tamanhos, formas e hábitos, resultado de inúmeras adaptações ao longo de sua evolução que os permitiram a dominarem rios, lagos e oceanos. (Helfman et al. 2009).

Diversos processos seletivos moldaram os mecanismos associados à comunicação intra e interespecífica desses animais, sendo a produção de sons um dos aspectos destacados (Maruska et al. 2007). Os peixes ósseos dispõem de uma grande variedade de mecanismos para a produção de sons, que podem ser simples ou sofisticados, desempenhando diferentes funções (Ladich 2014; Suthers et al. 2016). No entanto, é importante observar que há grupos nos quais as espécies são predominantemente silenciosas (Fine & Parmentier, 2015). Existem cinco mecanismos básicos pelos quais os peixes produzem sons: (1) vibrações musculares de uma membrana ou saco (Fine et al. 2009; Millot et al. 2011), (2) estridulação (Parmentier et al. 2010; Bertucci et al. 2014), (3) fluxo de ar forçado através de um pequeno orifício (Wahlberg & Westerberg 2003; Lagardère & Ernande 2004), (4) vibração muscular de apêndices (Kratovichil 1985; Ladich et al. 1992) e (5) percussão sobre um substrato (Colley et al. 2011).

Os sons emitidos por peixes ósseos geralmente incluem pulsos isolados, sequências de pulsos ou sons tonais, que são caracterizados por uma modulação de frequência ao longo do tempo. Esses sons, predominantemente de baixa frequência, ou seja, alocados em um espectro abaixo de 2kHz (Webb et al. 2008), podem atingir pouco mais de 1 kHz, e variam entre as espécies, com algumas capazes de produzir pulsos em frequências mais elevadas (Maruska et

al. 2007; Noda et al. 2016). Cada espécie de peixe possui padrões sonoros específicos (Amorim, 2006; Fine & Parmentier, 2015), permitindo a distinção entre suas vocalizações e as de outras fontes biológicas presentes em ambientes aquáticos, como cetáceos, camarões-pistola (Alpheidae) e ouriços-do-mar. Para teleósteos, as diferenças em parâmetros tais como frequência fundamental, frequência dominante, número de pulsos e período de pulso contribuem para essa distinção (Carriço et al. 2019). Os comportamentos de cortejo, agressividade e territorialidade estão associados a padrões bioacústicos intrinsecamente ligados à estrutura dos órgãos fonadores. Acredita-se que as características do meio aquático e sua composição de ruídos e fontes de diferentes origens possam influenciar as frequências, e a estrutura acústica dos sons (Lugli 2010; Tellechea et al. 2010). Em ambientes aquáticos ruidosos e/ou rasos, onde as baixas frequências têm propagação limitada e os sinais podem ser facilmente modificados, padrões temporais tornam-se cruciais para a comunicação acústica em peixes (Ladich, 2015; Ghahramani et al., 2014).

As características temporais e espectrais dos sons, muitas vezes relacionadas ao tamanho dos peixes, podem informar diferenças fenotípicas entre os animais. Estima-se que cerca de 1010 espécies de peixes sejam capazes de produzir sons (Looby et al. 2024). Além de refletirem os comportamentos mencionados, essas vocalizações são distintivas em agregações conhecidas como coros de peixes (Mok e Gilmore, 1983).

Há diversos desafios ao estudar a bioacústica de peixes em ambientes naturais: espécies distintas podem estar congregadas em um mesmo local, dificultando a identificação da origem e individualização da fonte sonora. Além disso, ao combinar observações visuais com registros acústicos, os peixes que emitem sons em circunstâncias específicas podem estar ocultos entre rochas, corais ou mesmo sob a areia (Cesar Augusto Marcelino Mendes Cordeiro, LECAR, UFF, com. pess.). Estudos conduzidos em águas turvas apresentam desafios adicionais, devido a falta de visibilidade. Consequentemente, a grande maioria das pesquisas se concentra em

estudos realizados em condições controladas, como tanques ou aquários, implicando na possibilidade de se obterem sons estereotipados resultantes do estresse do cativeiro (Parmentier et al. 2014). Portanto, um dos maiores desafios no estudo da biologia e das populações de peixes, reside na capacidade de coletar dados sem causar interferências ou perturbações a esses animais.

O estudo da bioacústica de peixes teleósteos teve início após a Segunda Guerra Mundial, quando a Marinha dos Estados Unidos buscava catalogar os sons produzidos por diferentes espécies (Fish & Mowbray 1970). Inicialmente, os estudos revelaram que várias espécies de peixes eram capazes de emitir sons específicos. No entanto, havia um viés do ponto de vista ecológico, pois os peixes eram estimulados a emitir sons e não o faziam espontaneamente (Fish & Mowbray 1970). Winn (1964) e Tavalga (1977) foram pioneiros a investigar os sons produzidos por peixes com base em comportamentos naturais, além de explorar os mecanismos subjacentes à produção sonora. A monografia de Breder (1967) sobre a produção sazonal de sons de várias espécies de peixes no sudoeste da Flórida também se destaca como um marco nesta área de estudo.

Desde então, os trabalhos têm se concentrado na caracterização individual dos sons de espécies de teleósteos através de experimentos em confinamento e/ou laboratório. Connaughton e Taylor (1995), por exemplo, registraram sons de duas espécies de cienídeos, *Bairdiella chrysoura* e *Micropogonias undulatus*, na Baía de Delaware, com o objetivo de comparar suas emissões aos dados acústicos em campo. No estudo, os peixes confinados emitiram sons cujos padrões foram facilmente identificados em termos de frequência e duração. Resultados semelhantes foram previamente descritos por Fish e Cummings (1972), a partir de animais em laboratório. Diversas outras espécies foram criadas em sistemas de aquicultura ou capturadas e submetidas a experimentos em laboratório (Fine et al., 1997; Tellechea et al. 2010).

O rápido avanço tecnológico a partir da década de 1990 possibilitou o desenvolvimento de instrumentos submersíveis de monitoramento acústico passivo, utilizados em pesquisas não invasivas. Esses dispositivos documentam horários, locais e áreas de desova de diferentes espécies de peixes em escalas espaciais e temporais variadas (Luczkovich et al. 2008). Descobriu-se que em cienídeos as taxas de produção de som são mais elevadas durante as estações reprodutivas (Saucier et al. 1992; Saucier et al. Baltz 1993; Luczkovich et al. 1999), o que também foi observado em Pomacentrídeos (Mann e Lobel 1995). Além disso, a avaliação sonora identificou sítios de desova para espécies ameaçadas como o Bacalhau do Atlântico e o Mero (*Epinephelus itajara*), abrindo novas oportunidades para a implementação de planos de manejo destinados à conservação destas populações (Rowell et al. 2012). Os sons registrados através do monitoramento acústico passivo também têm sido empregados para estimar a diversidade de peixes em diversos ecossistemas, como estuários (Wang et al. 2017), rios (Rountree et al. 2019), costões rochosos (Desiderà et al. 2019), cânions submarinos (Bolgan et al. 2020), recifes de coral (Parmentier et al. 2021), arquipélagos (Carriço et al. 2019) e em águas profundas (Rountree et al. 2012).

Assim, o Monitoramento Acústico Passivo (PAM) emerge como uma ferramenta crucial para localizar espécies migratórias e seus locais de desova. No caso de espécies residentes, como *Opsanus spp*, o monitoramento acústico fornece informações detalhadas sobre os padrões sonoros e comportamentais, assim como suas relações ecológicas com o ambiente (Fine & Thorson 2008). O PAM tem se revelado eficaz na caracterização de paisagens acústicas subaquáticas na avaliação das relações ecológicas entre as espécies emissoras de sons (Parmentier et al. 2018, Wall et al. 2013), especialmente quando combinado com o cálculo de índices acústicos (Sueur et al. 2014). Esses índices quantificam a biofonia e a antropofonia dentro de uma paisagem acústica (Sueur & Farina, 2015) permitindo a medição das variações da energia acústica em escalas temporais e espaciais de cada espécie sonora.

Dessa forma, o monitoramento acústico pode fornecer informações relevantes sobre a biodiversidade e abundância de espécies em um determinado ambiente, além de estabelecer conexões entre os sons biológicos e antropogênicos em diferentes níveis ecológicos (Siddagangaiah et al. 2019). Surge portanto a Ecologia de Paisagens Acústicas, um novo ramo da Ecologia que compreende a investigação ecológica e a interpretação dos sons de determinado ambiente, estudando-os ao longo de uma ampla escala espacial e temporal, no intuito de investigar a diversidade biológica, a abundância, o comportamento e a dinâmica dos animais no meio ambiente. Considera-se atualmente que a Ecoacústica englobe três componentes básicos: biofonia (sons biológicos), a geofonia (sons ambiente) e a antropofonia (sons decorrentes de atividades humanas), o que torna a paisagem acústica uma variável excelente para analisar os reflexos das interações do homem com o meio natural. (Pijanowski et al., 2011; Farina, 2014; Sueur et al., 2014; Staaterman et al., 2014).

A avaliação da biodiversidade costuma ocorrer predominantemente de maneira visual, como a observação de recifes de coral colorido, campos de gramíneas floridas ou florestas tropicais exuberantes. Contudo, a biodiversidade não se limita apenas à observação visual de paisagens ou espécies carismáticas, mas também é composta por sons individuais e coletivos. Podemos perceber a biodiversidade ao escutar sons naturais de uma paisagem ou espécies específicas (Pijanowski et al., 2011; Farina, 2014; Sueur et al., 2014; Staaterman et al., 2014; Sueur et al. 2021). Os animais emitem uma ampla variedade de sons para movimento, navegação e comunicação. A diversidade desses sons, emitidos de maneira intencional ou involuntária por organismos vivos, neste caso, pelos peixes em seus habitats, constitui a biodiversidade acústica. Considerando que a maioria dos sinais acústicos é trocada entre indivíduos da mesma espécie e utilizada para reconhecimento, as espécies apresentam assinaturas acústicas específicas que podem ser usadas pelos pesquisadores para identificação sem a necessidade de contato visual (Simpson et al., 2016; Popper e Hawkins, 2019).

No Brasil, a utilização da acústica passiva para o estudo de peixes é uma prática relativamente recente. Borie et al. (2014) conduziram uma análise sobre o dimorfismo sexual e padrões temporais dos sons emitidos por *Plagioscion squamosissimus*, uma espécie de Sciaenidae, em ambiente de água doce; Smith et al. (2018) caracterizaram sons reprodutivos em três espécies de curimatás (Prochilodontidae). No contexto marinho, Sanches e Padovese (2016) identificaram diversos tipos de coros de peixes no Parque Estadual da Laje de Santos. Resultados semelhantes foram observados na ilha oceânica de Trindade, onde Bittencourt et al. (2016), evidenciaram a presença de peixes soníferos durante a análise da paisagem acústica.

A Baía do Flamengo, em Ubatuba, destaca-se como um ambiente propício para o desenvolvimento de estudos sobre a bioacústica de teleósteos. É uma área de relevante desenvolvimento e reprodução de espécies neríticas e costeiras (Fundação Florestal, 2020). O local também abriga espécies de significância comercial, ecológica e econômica. Encontramos em um cenário no qual a riqueza e abundância da comunidade de peixes teleósteos na Baía do Flamengo variam a longo prazo (Mattox et al. 2014). Portanto, torna-se imperativo conduzir estudos que investiguem a composição da ictiofauna local. Além disso, esses ecossistemas enfrentam crescentes pressões antrópicas, resultantes da sobrepesca e da poluição marinha. Nesse sentido, é essencial conhecer, avaliar e descrever os sinais acústicos destes peixes.

Este trabalho poderá servir como referência para estudos em áreas mais remotas e ainda em áreas de preservação permanente, onde técnicas de amostragem invasivas não são alternativas viáveis. Poderá contribuir para o desenvolvimento da ciência pesqueira, e ainda para avaliar a ocorrência dos sinais e tipos de sons semelhantes, em outros locais, como forma de analisar a distribuição biogeográfica de peixes.

2. Objetivos

O propósito central deste estudo foi caracterizar a diversidade acústica das espécies de peixes teleósteos da Baía do Flamengo utilizando metodologias de pesquisa não invasivas como o monitoramento acústico passivo, excluindo assim a captura e manipulação direta dos animais. Como metas específicas, destacam-se: 1) avaliar na literatura a capacidade de emissão de sons pelas espécies de teleósteos já conhecidas na Baía do Flamengo; 2) identificar e caracterizar os sinais e repertórios acústicos desses peixes; 3) estimar a diversidade acústica através do emprego de índices acústicos; 4) analisar a distribuição temporal dos sons emitidos por essas espécies, dentro de um dia e durante um ano, ao longo das estações do ano; 5) disponibilizar, em bibliotecas digitais de acesso aberto, os registros sonoros identificados na Região.

3. Metodologia

3.1 Área de Estudo

O estudo foi realizado na Baía do Flamengo, mais precisamente na praia da Enseada, situada no município de Ubatuba, no litoral norte do estado de São Paulo. Também conhecida como Enseada do Flamengo, essa região apresenta uma profundidade máxima de 14 m, cobrindo uma área de aproximadamente 18 km², com uma largura média de 2,5 km, abrindo-se diretamente para o mar (Lançone et al. 2005). A localidade está orientada no sentido norte-sul, englobando as praias da Enseada ao sul, Saco do Perequê Mirim ao norte, Saco da Ribeira a noroeste, Ribeira, Flamengo e Flamenguinho a oeste (Figura 1). Todas essas praias apresentam águas calmas e declives suaves, além da presença de costões rochosos (Ab'Saber, 1955).

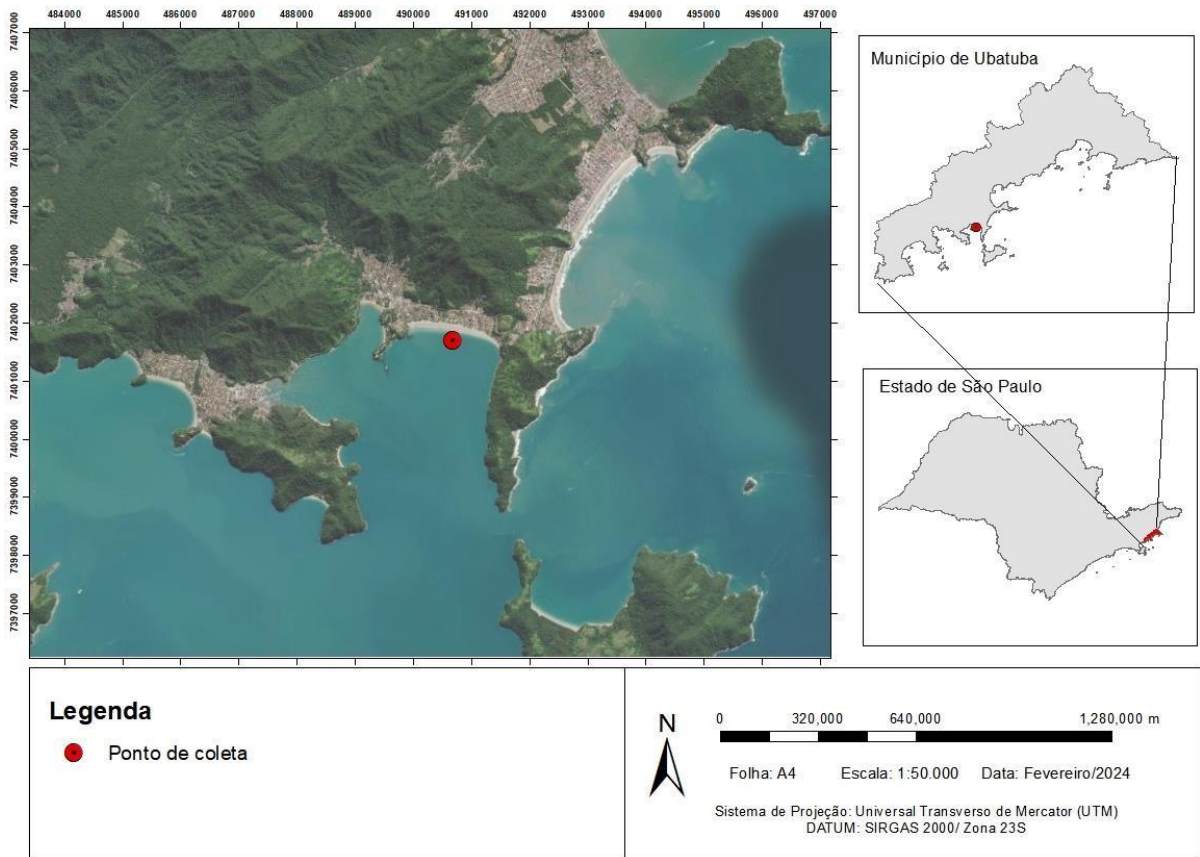


Figura 1: Localização da área de estudo e do respectivo ponto de coleta.

3.2 Coleta de dados

Os sons foram capturados por um dispositivo de gravação autônomo (*AudioMoth* v1.2.0), devidamente protegido em uma caixa estanque. O *AudioMoth* é um gravador acústico de baixo custo e espectro total, ele é capaz de ouvir em frequências audíveis, inclusive em frequências ultrassônicas. Ainda, pode gravar áudio não compactado em cartão microSD em taxas de 8.000 a 384.000 amostras por segundo e pode ser convertido em um microfone USB de espectro total.

Assim, o dispositivo foi posicionado a uma profundidade de 1m abaixo da superfície, preso a uma corda que faz parte da estrutura utilizada para fundear embarcações. No ponto amostral, a profundidade do local atinge aproximadamente 5 metros de profundidade. Essa estrutura inclui uma bóia de superfície, usada para indicar a localização da âncora. Ambas estão

conectadas por meio da respectiva corda, a uma distância de aproximadamente 150 metros da faixa da areia. Esse local foi escolhido devido a questões estratégicas: fácil acesso, presença de uma comunidade pesqueira, águas claras, calmas e reconhecido pela biodiversidade potencial de teleósteos.

O dispositivo recebeu 3 baterias recarregáveis de NiMH com capacidade de 2550 mAh, um cartão microSD de 32 GB e gravou a uma taxa de 16 kHz, 16 bits, empregando a seguinte programação: quatro períodos de 2 horas em ciclos de 24 horas (06-8h, 12-14h, 16-18h, 19-21h), durante 10 dias contínuos, ao longo das quatro estações: inverno, primavera, verão e outono, nos períodos de 10 a 20 de setembro de 2022, 09 a 19 de dezembro de 2022, 11 a 21 de março de 2023 e 29 de abril a 08 de maio de 2023, respectivamente.; em cada período, foram gravadas amostras de 15 minutos, intercaladas por pausas de 5s. Esses períodos foram escolhidos com base na literatura disponível, indicando que são momentos em que os peixes provavelmente estão mais ativos acusticamente. Os registros dos sons dos teleósteos foram realizados

Dessa forma, foram obtidos 32 arquivos de áudio por dia, cada um com 29 MB, totalizando 868 MB/dia. O consumo diário de energia foi estimado em 75 mAh. Os períodos amostrais de 10 dias foram distribuídos ao longo das quatro estações do ano. Dados de temperatura média do oceano no entorno do ponto de amostragem foram extraídos dos bancos de dados disponibilizados pelo Copernicus Marine Service [<https://marine.copernicus.eu/>], que utilizam informações provenientes de observações de satélite e *in situ*, assim como modelos numéricos, oferecendo análises e previsões de última geração.

3.3. Análise Acústica

Os dados acústicos do *AudioMoth* foram transferidos dos cartões microSD para o computador e, em seguida, armazenados na nuvem (Google Drive) para análises posteriores.

Diante do considerável volume de dados coletados, optou-se por selecionar 3 dias consecutivos dentre os 10 dias amostrados.

Posteriormente, os dados correspondentes a essas estações foram submetidos a análises auditivas e visuais por meio do programa Raven Pro 1.6.5 (Bioacoustics Research Program, Universidade de Cornell). Essa análise envolveu o uso da transformada rápida de Fourier (FFT) com tamanho de 512 pontos, 50% de sobreposição, janela Hann. Todos os sons que apresentavam características semelhantes às emitidas por espécies vocais ou reconhecidos como produzidos por atividades de peixes foram identificados individualmente.

Os sinais acústicos individuais foram caracterizados por meio dos seguintes parâmetros acústicos: (1) duração do som (em ms); (2) frequência dominante (frequência com maior energia, em Hz); (3) frequência 5% (frequência que divide o conteúdo espectral em dois intervalos contendo 5% e 95% da energia, em Hz); (4) frequência central (frequência que divide o conteúdo espectral em dois intervalos de igual energia, em Hz) e (5) frequência 95% (frequência que divide o conteúdo espectral em dois intervalos finos contendo 95% e 5% da energia, em Hz).

Durante a inspeção e análise pelo Raven, a caracterização desses sons seguiu o diagrama adaptado de Desiderà et al. (2019) e Bolgan et al. (2020), que apresenta descrições detalhadas da estrutura acústica dos possíveis sons de peixes (Figura 2). As definições e descrições das categorias dos sons foram baseadas na tabela encontrada em Bolgan et al. (2020).

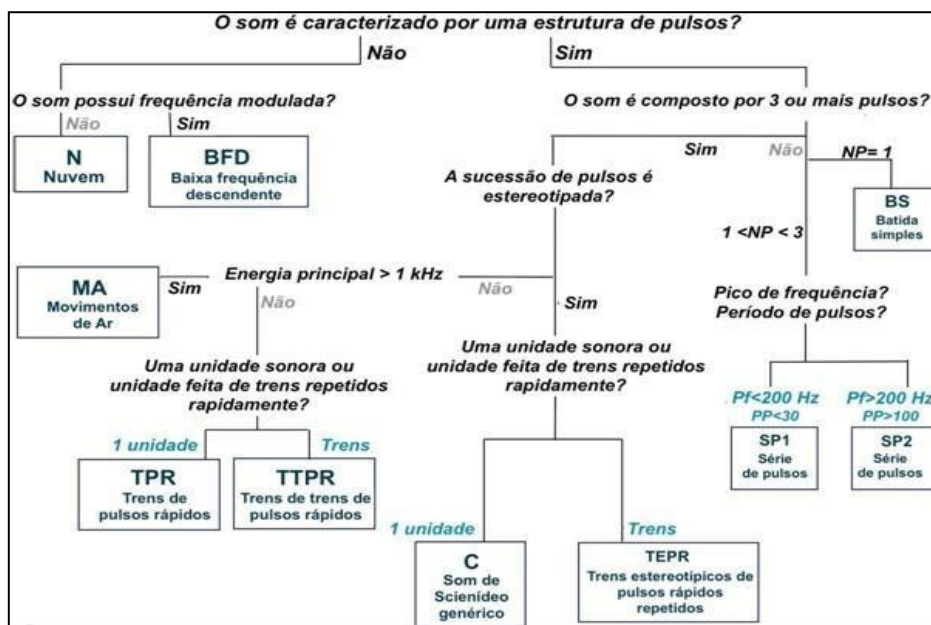


Figura 2: Diagrama descritivo da forma de identificação e classificação da estrutura acústica de sons de peixes. Adaptado de Desiderà et al. (2019) e Bolgan et al. (2020).

A variabilidade das medidas de frequência (Frequência Dominante, Frequência 5% e Frequência 95%, todas em Hz), foi registrada e analisada para cada estação do ano, sendo apresentada por meio de histogramas, os quais indicam a distribuição de frequências dos parâmetros medidos. Desta maneira, avaliou-se a sazonalidade das concentrações das emissões de som e dos coros dos animais entre as estações do ano.

Para estimar a diversidade de peixes, utilizaram-se os seguintes índices acústicos: ACI (índice de complexidade acústica), que mensura a intensidade do som em diferentes faixas de frequência, apresentando valores elevados para a emissão sonoras de peixes e valores baixos na presença de sons antropogênicos de embarcações e ruído ambiente (Siddagangaiah et al. 2019); H (entropia acústica), que reflete a uniformidade da amplitude de um sinal ao longo do tempo e em toda a faixa de frequência (Harris et al. 2016). Os índices foram avaliados e comparados entre os períodos do dia de cada estação, bem como entre as estações do ano como um todo. Tais índices têm sido considerados confiáveis para mensurar a diversidade do grupo-alvo do estudo (Harris et al. 2016).

Para avaliar a homogeneidade de variâncias e a distribuição normal dos dados, foram conduzidos o Teste de Levene e o teste de Shapiro Wilk, respectivamente, nas amostras analisadas. As comparações foram efetuadas por meio do Teste de Kruskal-Wallis para comparação múltipla não-paramétrica, seguida pelo pós-teste de Dunn. Todas as análises foram realizadas no ambiente de programação R, utilizando os pacotes de funções “soundecology” e “seewave” (Sueur et al. 2008, Villanueva-Rivera & Pijanowski, 2013).

4. Resultados e discussão

4.1. Avaliação da capacidade de emissão de sons pelas espéciesde teleósteos já registradas na Baía do Flamengo

A partir do estudo de Mattox e colaboradores (2014), que identificou espécies de teleósteos comumente encontradas na Baía do Flamengo, foi possível notar que o local oferece grande potencial para o estudo da produção de sons em peixes teleósteos, uma vez que a maioria das famílias apresentadas possui a capacidade de emitir sons. A Tabela 1 apresenta a lista destas espécies e suas respectivas capacidades de produzir sons. Importante ressaltar que as espécies sobre as quais não há informações disponíveis podem ser alvo de novas descobertas no campo da bioacústica.

Tabela 1: Espécies de peixes teleósteos encontrados na Baía do Flamengo, Ubatuba, e sua capacidade de produção de som. As que não possuem informação são classificadas como “nd”.

Espécies	Família	Produção de som	Referência Bibliográfica
<i>Balistes capriscus</i>	Balistidae	sim	Fish & Mowbray 1970
<i>Selene setapinnis</i> <i>Selene vomer</i>	Carangidae	sim	Fish & Mowbray 1970; Robins, C.R. and G.C. Ray, 1986; Kaschner, 2012
<i>Symphurus tessellatus</i>	Cynoglossidae	nd	
<i>Dactylopterus volitans</i>	Dactylopteridae	sim	Fish & Mowbray 1970
<i>Chilomycterus spinosus</i>	Diodontidae	sim	Fish & Mowbray 1970

Espécies	Família	Produção de som	Referência Bibliográfica
<i>Diapterus rhombeus</i> <i>Eucinostomus argenteus</i> <i>Eucinostomus gula</i>	Gerreidae	sim	Fish & Mowbray 1970; Kaschner 2012; Green, 1971
<i>Conodon nobilis</i> <i>Haemulon steindachneri</i> <i>Orthopristis ruber</i> <i>Haemulopsis corvinaeformis</i>	Haemulidae	sim	Fish & Mowbray 1970; Costa-Neto, 2000; Bertucci, 2014
<i>Mullus argentinae</i>	Mullidae	sim	Protasov & Romanenko 1962
<i>Citharichthys macrops</i> <i>Citharichthys spilopterus</i> <i>Etropus crossotus</i> <i>Syacium papillosum</i>	Paralichthyidae	sim	Fish 1954
<i>Cynoscion jamaicensis</i> <i>Isopisthus parvipinnis</i> <i>Larimus breviceps</i> <i>Macrodon atricauda</i> <i>Menticirrhus americanus</i> <i>Paralonchurus brasiliensis</i> <i>Stellifer rastrifer</i> <i>Micropogonias furnieri</i>	Sciaenidae	sim	Fish & Mowbray 1970; Luczkovich, 1999; Mann, 2009; Borie et al. 2021; Tellechea, 2019; Tellechea, 2011
<i>Peprilus paru</i>	Stromateidae	sim	Fish 1954
<i>Diplectrum radiale</i> <i>Epinephelus morio</i>	Serranidae	sim	Fish & Mowbray 1970; Locascio, 2016
<i>Trichiurus lepturus</i>	Trichiuridae	nd	
<i>Prionotus nudigula</i> <i>Prionotus punctatus</i>	Triglidae	sim	Evans 1973

4.2. Identificação dos sinais e repertórios acústicos

Apesar das coletas de dados somarem 10 dias de gravação, foram analisados apenas os 3 primeiros dias para cada estação do ano amostrada. No cenário da paisagem acústica subaquática da Baía do Flamengo, a antropofonia, ou seja, sons decorrentes das atividades humanas, foi dominada pelo som das embarcações, enquanto a geofonia, sons ambiente gerados por eventos geofísicos e meteorológicos, foi representada principalmente pela correnteza sobre o *AudioMoth*. A biofonia, caracterizada por sons de atividades biológicas, foi representada pelos sinais e repertórios acústicos dos peixes.

Foram analisadas mais de 5900 amostras de sinais acústicos, distribuídas em 96 horas de áudio analisados. Os sinais acústicos foram agrupados em 22 valores distintos de frequências dominantes (em inglês “peak frequency”), das quais apenas quatro foram identificadas em todas as estações do ano. No outono, 21 dessas frequências foram observadas. A Tabela 2 exibe os resultados obtidos para todas as estações do ano.

Tabela 2: número de chamados referentes a cada emissão com frequência dominante distinta e valores médios $\pm$ desvio padrão das variáveis acústicas medidas. Freq = Frequência.

Quantidade de chamados	Freq. Fund. (Hz)	Delta Tempo (s)	Freq 5% (Hz)	Freq 95% (Hz)	Freq. Central (Hz)
2206	500	0,8 $\pm$ 0,7	297,7 $\pm$ 89,3	583,6 $\pm$ 51,2	476,1 $\pm$ 34,1
599	468,7	1 $\pm$ 0,7	290,1 $\pm$ 60,7	575,2 $\pm$ 49,1	456,5 $\pm$ 21,4
580	125	0,4 $\pm$ 0,4	62,8 $\pm$ 24,4	393,4 $\pm$ 138,9	165,3 $\pm$ 74,9
428	93,7	0,6 $\pm$ 0,5	51,4 $\pm$ 15,7	270,9 $\pm$ 103,5	110,4 $\pm$ 39,4
321	437,5	0,9 $\pm$ 0,6	281,9 $\pm$ 41,7	578,5 $\pm$ 73,7	440 $\pm$ 16,6
246	312,5	0,5 $\pm$ 0,5	138,9 $\pm$ 77,0	528,6 $\pm$ 77,8	328,8 $\pm$ 67,8
197	531,2	0,5 $\pm$ 0,6	359,1 $\pm$ 104,9	663,6 $\pm$ 166,5	515,9 $\pm$ 29,3
155	62,5	0,5 $\pm$ 0,4	33,6 $\pm$ 14,1	280,4 $\pm$ 141,3	106,3 $\pm$ 62,3
142	562,5	0,5 $\pm$ 0,5	301,0 $\pm$ 101,3	690,6 $\pm$ 185,2	510,4 $\pm$ 39,4
138	187,5	0,9 $\pm$ 0,8	138,7 $\pm$ 59,4	525,6 $\pm$ 105,7	324,6 $\pm$ 113,1
137	250	0,3 $\pm$ 0,4	114,4 $\pm$ 63	528,3 $\pm$ 177,6	285 $\pm$ 73,3
97	375	0,6 $\pm$ 0,6	182,1 $\pm$ 72,1	593,7 $\pm$ 68,7	391,7 $\pm$ 52,6
91	281,2	0,4 $\pm$ 0,5	108,7 $\pm$ 54,4	468,7 $\pm$ 104,1	269,5 $\pm$ 65,6
89	343,7	0,3 $\pm$ 0,3	140,6 $\pm$ 65,1	533,1 $\pm$ 92,5	329,5 $\pm$ 49
75	156,2	84,1 $\pm$ 31,7	419,8 $\pm$ 99,5	419,8 $\pm$ 99,5	206,9 $\pm$ 67,7
72	406,2	1,0 $\pm$ 0,7	261,2 $\pm$ 59,9	583,1 $\pm$ 52,9	421,9 $\pm$ 25,9
69	218,7	0,5 $\pm$ 0,5	129 $\pm$ 58,2	490 $\pm$ 67,3	283,2 $\pm$ 69,5
31	593,7	0,3 $\pm$ 0,3	375 $\pm$ 77,9	715,3 $\pm$ 82,6	559 $\pm$ 17,7
26	687,5	0,6 $\pm$ 0,6	500 $\pm$ 25,5	895,8 $\pm$ 96,6	656,2 $\pm$ 25,5
24	625	0,3 $\pm$ 0,1	328,1 $\pm$ 203,1	718,7 $\pm$ 31,2	500 $\pm$ 125
1	718,7	0,4	406,2	843,7	656,2
1	781,2	0,7	468,7	843,7	562,5

As emissões sonoras dos peixes predominaram nas frequências dominantes de 500 Hz, 468,7 Hz e 125 Hz, representando 41,32%, 10,91%, e 10,56 % respectivamente, de todos os sinais acústicos amostrados ao longo do ano.

O campo de estudo da bioacústica de peixes é marcado por lacunas que ainda limitam a identificação precisa das espécies de teleósteos no ambiente natural. De um modo geral, os sons são classificados em categorias ou tipos de sons. Esses tipos podem se referir a uma única espécie ou a um grupo que compartilha características acústicas semelhantes. Nota-se também que uma espécie pode produzir mais de um tipo de som (Banse et al. 2023). Segundo Desiderà et al. (2019) e Bolgan et al. (2020), os sons individualizados encontrados neste estudo podem ser categorizados como série de pulsos, som genérico de scienídeo e trens de pulsos rápidos (Figura 3).

Os sons emitidos pelos peixes teleósteos em agregações conhecidas como coros também foram observados na Baía do Flamengo. Esse fenômeno pode estar relacionado tanto a espécies individuais (Ceraulo, 2020), quanto múltiplas espécies (Borie, 2022). Em nossos dados, o coro dos peixes esteve presente nas estações de verão e inverno, e foi composto apenas de sequências de pulsos, de forma consistente (Figura 4), indicando que este coro é caracterizado pela presença de uma única espécie agregada. As agregações foram responsáveis por emissões predominantemente na faixa de frequência dominante de 500 Hz, com poucas emissões em frequência dominante de 468,7 Hz, em ambas as estações do ano, com duração de aproximadamente 1 hora.

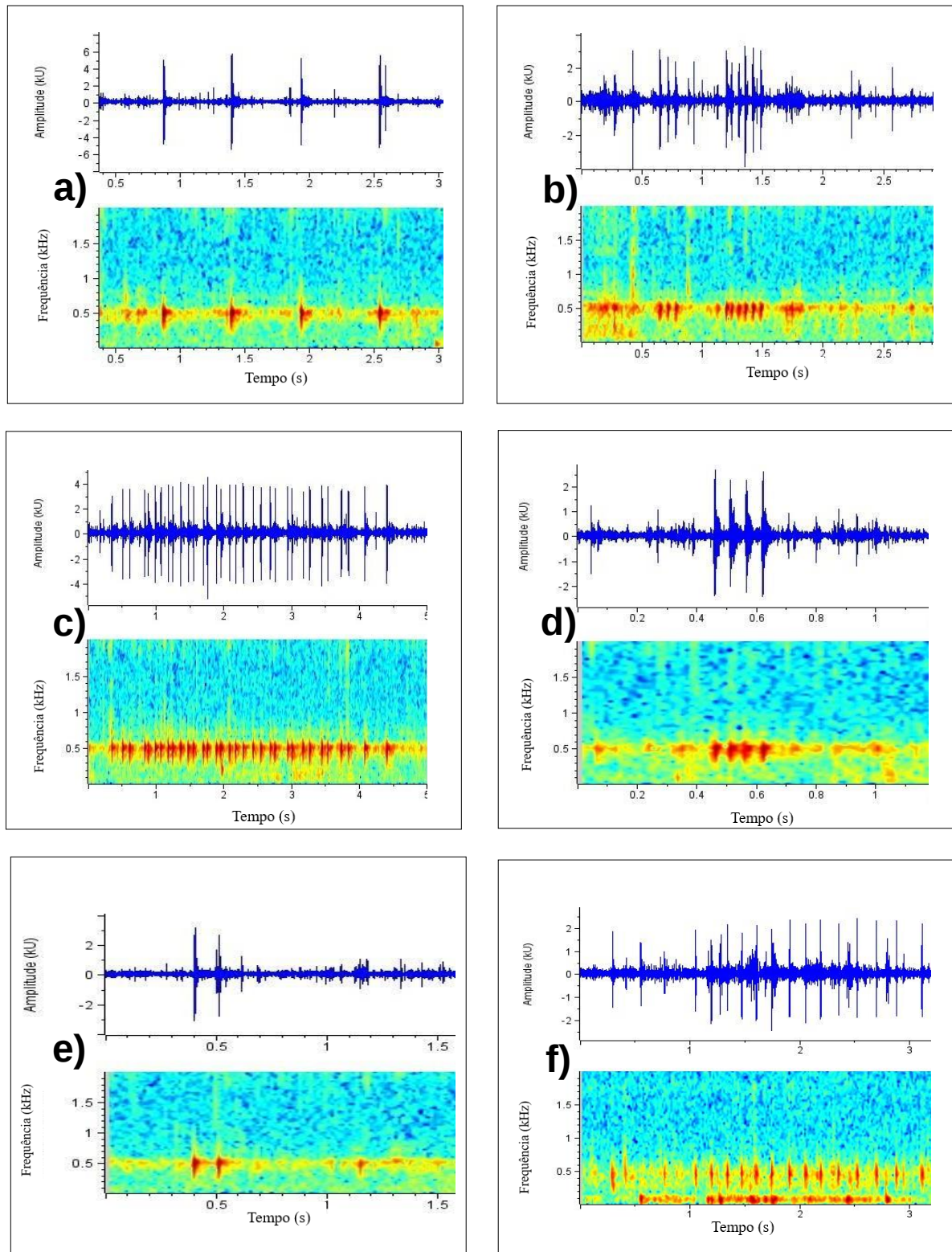


Figura 3: Tipos de sons obtidos nas amostras: som de sci-fi genérico (a, c, d, f); trens de pulsos rápidos (b), série de pulsos (e). Parâmetros de configuração dos espectrogramas: tipo de janela Hann, tamanho de janela 512 pontos, largura de banda de filtro 3dB 135 Hz, sobreposição 50%.

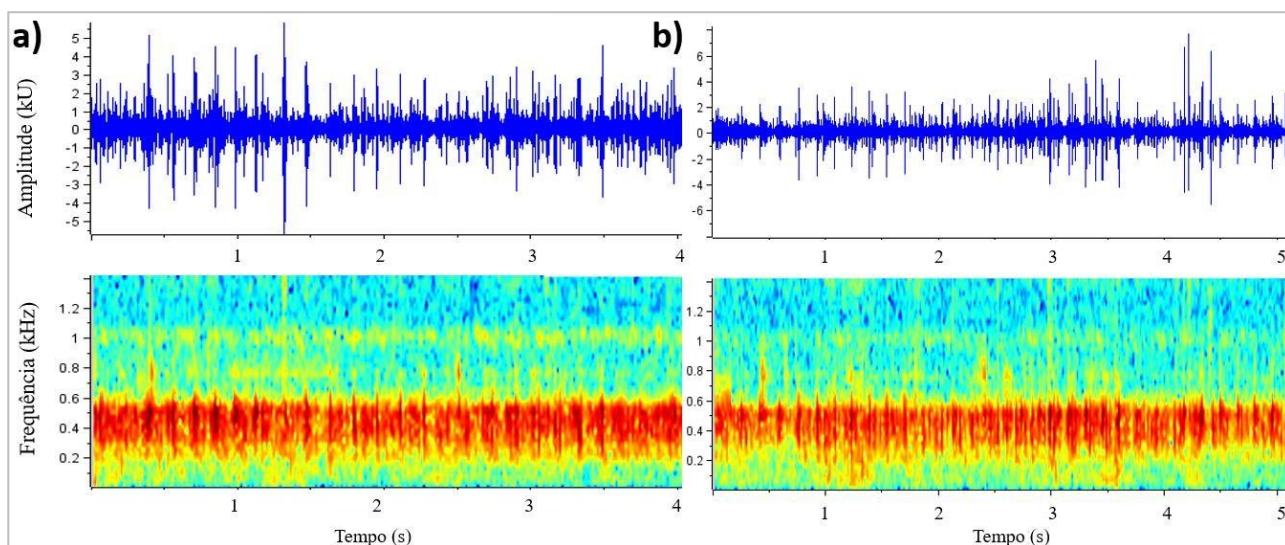


Figura 4: Coro noturno no inverno (a) e no verão (b). Parâmetros de configuração dos espectrogramas: tipo de janela Hann, tamanho de janela 512 pontos, largura de banda de filtro 3dB 135 Hz, sobreposição 50%.

Ao analisar os diversos bancos de dados acústicos de peixes, os mecanismos de produção de som, a anatomia de órgãos produtores de som, e os tipos de sons emitidos neste estudo, foi possível concluir que as amostras gravadas não incluem sons estridulatórios decorrentes do atrito de estruturas ósseas, característicos da família Haemulidae, por exemplo, nem apresentam sons tonais.

Os sons produzidos pela família Sciaenidae geralmente consistem em uma sequência de pulsos rápidos. Diversos estudos indicam uma relação positiva entre o tamanho dos peixes e a duração do pulso, ao passo que a relação é negativa com a frequência dominante (Connaughton et al. 2000). Este é um ponto crucial, pois uma mesma espécie pode apresentar variações em seu repertório sonoro. A faixa de frequência dos pulsos pode variar significativamente, podendo abranger vários quilohertz (kHz), mas a frequência dominante ocorre predominantemente no intervalo entre 100 e 1.000 Hz (Ramcharitar et al. 2006). Essas características são consistentes com os dados obtidos neste estudo, tanto para os sinais acústicos ao longo do ano, como para o coro nas estações de verão e inverno.

4.3. Análise da distribuição temporal dos sons dos teleósteos

Das vinte e duas frequências fundamentais, onze foram identificadas no verão, enquanto oito foram registradas no inverno. Nas estações intermediárias, primavera e outono, foram observadas dezoito e vinte e uma frequências fundamentais, respectivamente. Os histogramas na Figura 5 ilustram as distribuições dos parâmetros de frequência em Hz.

Durante o verão, uma distribuição mais pronunciada foi notada, com predominância de frequências fundamentais entre 400 Hz e 500 Hz. No inverno e na primavera, uma gama mais ampla de frequências fundamentais foi observada, ainda com predominância entre 400 Hz e 500 Hz. No outono, por outro lado, predominam frequências fundamentais mais baixas, variando entre 90 e 150 Hz.

Observou-se que os teleósteos emitem sons ao longo de todos os períodos analisados, desde a manhã até a noite, em todas as quatro estações do ano consideradas. Não há períodos do dia em que essas emissões de sons não ocorram. Nota-se que, para as primeiras estações do ano (inverno, primavera e verão), os dados foram coletados durante a lua cheia, o que correspondendo à maré de sizígia, enquanto os dados do outono foram coletados durante a lua crescente, em maré de quadratura.

Como mencionado, o verão registrou o maior número de ocorrências de sinais acústicos de peixes em comparação as outras estações. No total, foram identificados 2351 sinais para o verão, 1076 para a primavera, 1303 para o outono e 1200 assinaturas de peixes teleósteos para o inverno. Os sinais acústicos encontrados possivelmente pertencem à família de teleósteos sonoros, Sciaenidae. As emissões de sons pelos teleósteos seguem um padrão observado nas quatro estações amostradas, demonstrando uma periodicidade marcada ao longo do dia. Essas emissões ocorrem predominantemente de manhã e à noite, diminuindo durante a tarde e no final do dia. Esta tendência está representada na Figura 6.

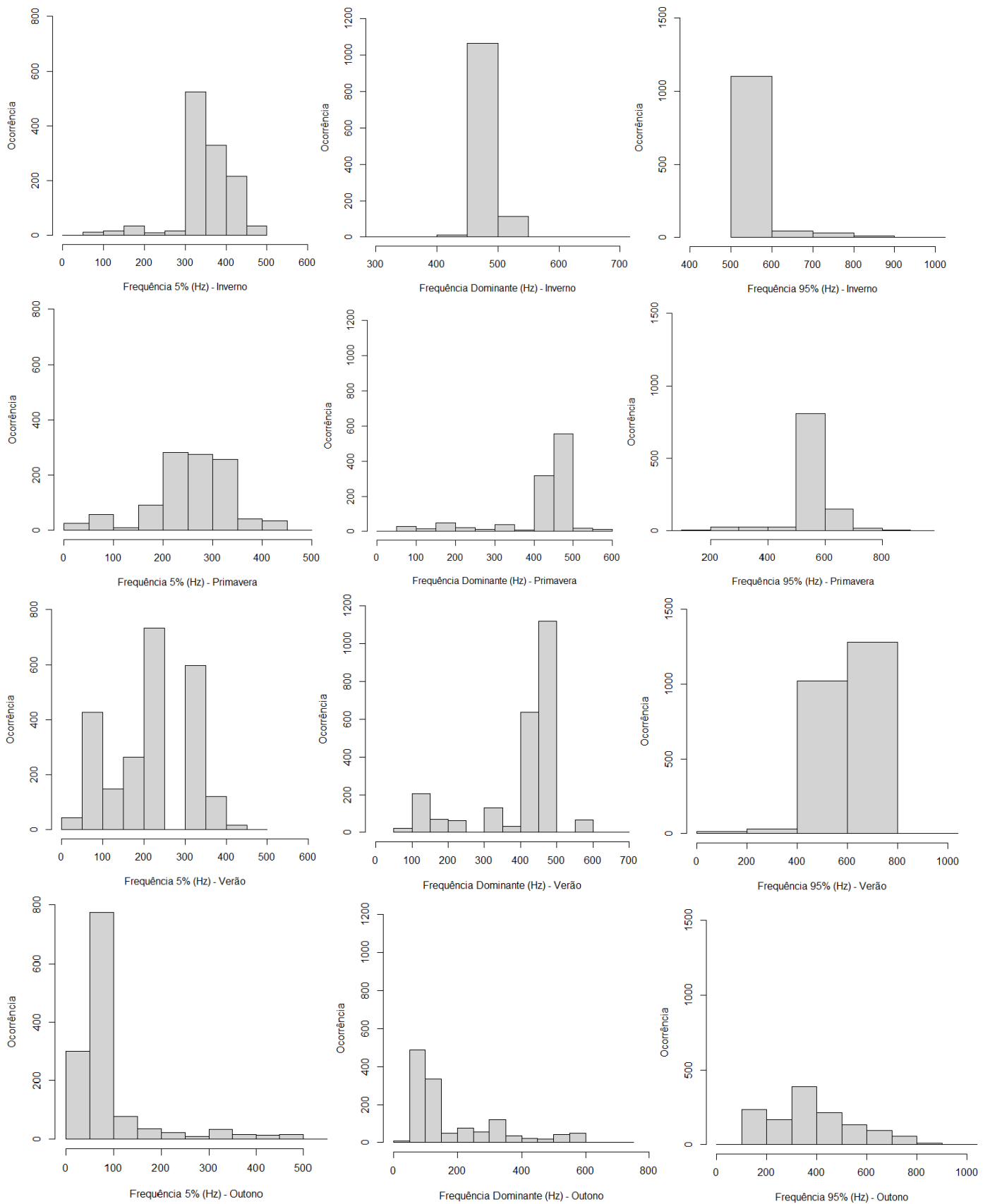


Figura 5: Variabilidade dos parâmetros de frequência (Frequência Dominante, Frequência 5% e Frequência 95%, em Hz) registradas nas amostras de sons coletados, para todas as estações do ano.

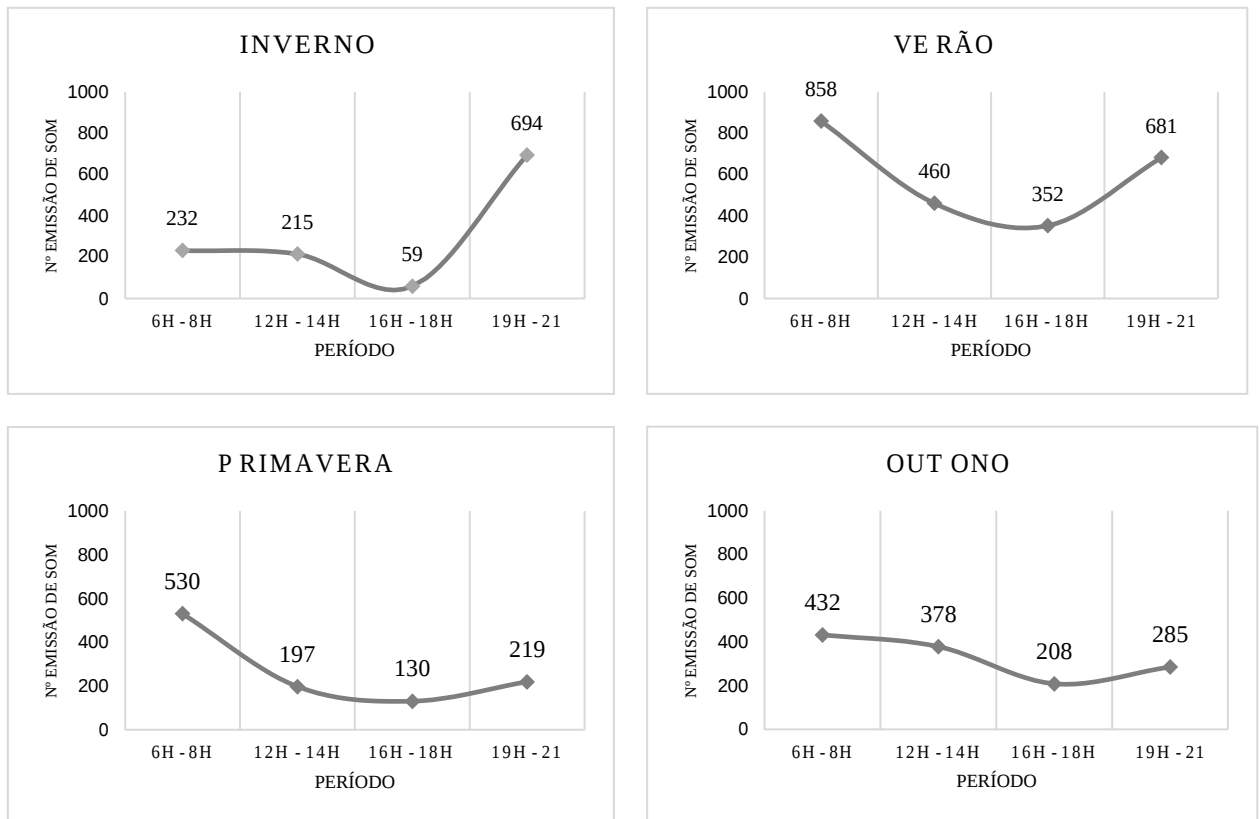


Figura 6: Variação na quantidade de emissão de sons de teleósteos ao longo do dia, em todas as estações do ano.

Siddagangaiah e colaboradores (2021) encontraram padrões semelhantes em seus estudos. A ocorrência, duração e intensidade de sinais acústicos de peixes variaram de acordo com a estação do ano, apresentando picos mais elevados durante os meses de verão. A periodicidade dessas emissões pode estar relacionada a vários fatores, como temperatura e salinidade da água, período reprodutivo das espécies, padrões lunares, nascer e pôr do sol (McCauley, 2012, McWilliam, 2017, Helfman, 1986, Ruppé, 2015). Em seu estudo, Brewster e colaboradores (2023), registraram os chamados da garoupa (*Epinephelus itajara*) ao longo de todas as estações do ano na costa do Golfo do México; entretanto, observaram uma diminuição na taxa de vocalizações nos meses de inverno. Além disso, notaram também que o ciclo lunar e o ruído de fundo influenciaram a taxa e a emissão de sons pelos teleósteos. As taxas de vocalização diminuíram e a produção sonora foi reduzida em resposta ao aumento de ruído de fundo.

Eventos climáticos extremos, como tempestades, podem influenciar o comportamento dos teleósteos e, conseqüentemente, seus padrões acústicos (Morisette, 2009). Contudo, para nosso estudo, esse fator não afetou o comportamento vocal dos peixes, pois não houve ocorrências de chuvas ou tempestades na Baía do Flamengo durante os dias amostrados.

No outono, predominaram frequências dominantes inferiores em comparação com outras estações do ano. Notavelmente, durante essa estação, os valores do índice de complexidade acústica não apresentaram diferenças significativas entre os períodos do dia analisados, sugerindo uma uniformidade na diversidade ao longo do dia. Uma particularidade do outono, que o difere das outras estações, é a fase lunar durante a coleta dos dados. Durante o outono, as emissões dos teleósteos coincidiram com a lua crescente, enquanto no inverno, primavera e verão ocorreram durante a lua cheia.

O ciclo lunar pode ser um dos principais fatores que influenciam o comportamento vocal e a agregação de espécies em um determinado local. É durante a fase de lua nova que ocorrem as emissões de sons de desova de *Epinephelus itajara*, por exemplo (Koenig, 2017, Brewster, 2023). Outro exemplo é o peixe anjo (*Centropyge potteri*), membro da família Pomacanthidae, que emite sons de desova exclusivamente durante o período noturno, na semana que precede a lua cheia (Lobel, 1978). Padronizar a coleta de dados para registrar sons durante o mesmo ciclo lunar poderia fornecer informações mais consistentes sobre a periodicidade da emissão de sons por esses animais, dada a influência desse fator no comportamento vocal dos peixes.

Dados do Copernicus Marine Service revelaram que as temperaturas médias da superfície da água da Baía do Flamengo aumentaram ao longo do ano, alcançando 21,5 °C no inverno, 25,3 °C no outono, 27,1 °C na primavera e 28,3 °C no verão. O gráfico subsequente (Figura 7) mostra a relação entre a temperatura média dos períodos amostrados para cada estação do ano, representada pela curva pontilhada azul, e o número de chamados emitidos pelos teleósteos ao longo das estações do ano, em linha vermelha.

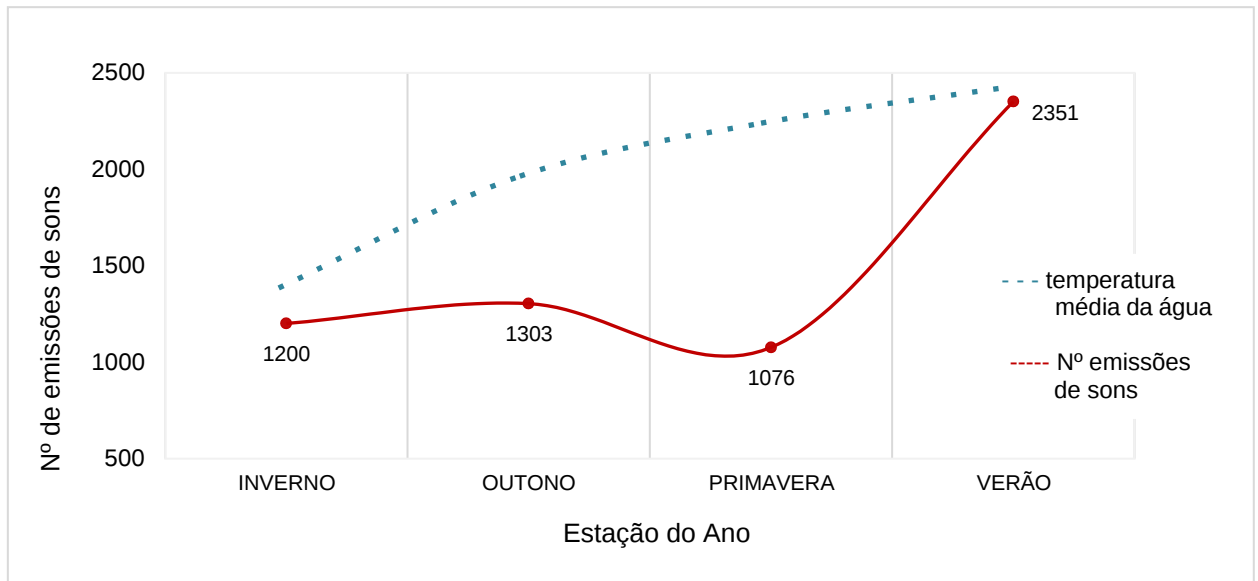


Figura 7: Variação na quantidade de emissão de sons de teleósteos, divididos por estações do ano, relacionados a temperatura média do oceano.

Observa-se que o número de chamados de peixes aumenta conforme a temperatura da superfície da água aumenta, com exceção da primavera. Apesar de a temperatura nesta estação ser superior ao inverno e ao outono, o número de chamados de peixes é inferior comparado a estes últimos.

A temperatura é um fator ambiental crítico na ecologia dos teleósteos, influenciando seu metabolismo e comportamento. Espécies que se reproduzem em águas costeiras estão mais suscetíveis às flutuações de temperatura devido à menor inércia térmica em relação às águas de mar aberto, por exemplo (Vinagre et al., 2018). Esse parâmetro pode ser avaliado tanto em curto prazo, como em diferentes estações do ano, quanto em longo prazo, considerando mudanças climáticas. O comportamento de cortejo visual é afetado por essas variações, podendo impactar a comunicação acústica devido a alterações nos processos de produção e recepção de sinais (Ladich, 2018, Wilson, 2005, Bartolini et al., 2015). Em certas espécies das famílias Sciaenidae e Batrachoididae, por exemplo, as vocalizações aumentam com o aumento da temperatura (Montie et al. 2015). Contudo, a atividade vocal cessa fora dos intervalos de temperatura ideais para cada espécie (Monczak et al., 2022).

Um ponto relevante a destacar é o aumento no número desses chamados no verão. Embora a maior concentração de emissões de som tenha ocorrido das 6h às 8h durante essa estação, o coro de peixes também se manifestou no período noturno (entre 19h e 21h), tanto no verão como no inverno. Nas manhãs da primavera e do outono, foram observados os períodos em que os peixes mais emitiram sinais acústicos. Por outro lado, para estas últimas estações do ano, não foi observado o coro de peixes em nenhum dos períodos estudados.

Os chamados relacionados a comportamentos de reprodução geralmente atingem o pico durante as horas crepusculares ou noturnas (Ramcharitar et al. 2006), formando um coro, o que foi observado em nossos dados tanto no verão quanto no inverno. Os coros dos peixes podem durar algumas horas, e dependendo da espécie e do ambiente que estão inseridos, apresentam padrões temporais distintos (Rice et al. 2016). A variação temporal do coro pode ser influenciada por fatores como ciclo de marés, ciclo lunar, propriedades físicas da água e também pelo ruído antropogênico (Bolgan 2022).

Podemos citar o trabalho de Bittencourt e colaboradores (2023), que estudaram coros de peixes em dois locais na Baía de Guanabara, no Rio de Janeiro. Apesar da proximidade entre eles, que é de 6 km, observou-se diferenças na temperatura de cada ponto amostral. Esse fator esteve correlacionado com padrões de frequências dominantes diferentes para cada localidade, indicando que mudanças ambientais podem ocasionar variações nos parâmetros acústicos, ou então, que essa relação seja resultado de preferências de habitats. O número de estudos que abordam a relação de fatores ambientais com o comportamento de coro dos peixes ainda é pouco significativo no sudoeste do Oceano Atlântico (Bittencourt et al 2023), o que torna o cenário da bioacústica de peixes no Brasil, um campo a ser explorado e melhor compreendido.

A coleta de dados foi realizada em períodos pré-determinados, nos quais se esperava encontrar os peixes mais ativos em termos acústicos. No entanto, devido à variabilidade na emissão de sons e às supostas influências de fatores bióticos e abióticos na produção sonora

desses animais, não podemos descartar a possibilidade de inatividade do coro dos peixes durante as estações de outono e primavera. Acredita-se que esse fenômeno poderia ser observado em uma amostragem mais ampla e contínua de 24 horas.

As agregações de teleósteos em locais recorrentes são fundamentais para a reprodução e comunicação desses animais. Além de reunir um número significativo de indivíduos em um único local, esses eventos contribuem para a compreensão da dinâmica populacional de uma espécie e podem influenciar a implantação de áreas de conservação ambiental, assim como a definição de proibições e permissões de zonas de pesca (Appeldoorn-Sanders et al. 2022).

Os chamados dos teleósteos podem ser estudados para entender como esses animais utilizam esses ambientes e monitorar sua qualidade. No contexto da Baía do Flamengo e da conservação marinha, é relevante ressaltar a proximidade da praia da Enseada com o Parque Estadual da Ilha Anchieta, uma Unidade de Proteção Integral, que preserva 828 hectares e proíbe qualquer modalidade de pesca.

4.4. Avaliação da biodiversidade através do uso de índices acústicos

As Tabela 3 e 4 exibem as médias e desvios padrões dos valores encontrados para os índices de complexidade acústica (ACI) e de entropia acústica (H) em cada uma das estações do ano amostradas.

Tabela 3: Média e desvio padrão do índice de complexidade acústica (ACI), dos quatro períodos analisados, para todas as estações do ano avaliadas

	ACI			
	6h-8h	12h-14h	16h-18h	19h-21h
Inverno	19947,0±558,9	19025,7±750,4	17495,4±663,2	20136,1±367,1
Verão	16484,4±339,7	16140,8±832,5	15902,8±618,3	15979,4±563,1
Primavera	17097,9±2102,6	18048,7±1096,8	17242±1379,4	15848,1±1163,5
Outono	15057,3±731,2	15159,3±710,8	15093,1±624,6	15189,7±783,1

Tabela 4: Média e desvio padrão do índice de entropia (H), dos quatro períodos analisados, para todas as estações do ano avaliadas

	H			
	6h-8h	12h-14h	16h-18h	19h-21h
Inverno	0,89±0,02	0,84±0,03	0,77±0,03	0,81±0,05
Verão	0,88±0,01	0,83±0,04	0,85±0,01	0,87±0,03
Primavera	0,80±0,06	0,73±0,06	0,74±0,06	0,78±0,07
Outono	0,79±0,08	0,77±0,06	0,75±0,05	0,78±0,04

O índice de complexidade acústica (ACI), desenvolvido por Pieretti et al. (2011), é uma métrica que avalia os sons biológicos com base na variação das intensidades ao longo do tempo, sendo independente do ruído constante gerado pelo homem. Ele não foi concebido para detectar variações em sons constantes, como ruídos de navios ou coros compactos e intensos de peixes. Neste estudo, o índice de complexidade acústica foi avaliado em todos os períodos do dia e nas quatro estações do ano.

Os valores mais elevados de ACI foram observados entre 19h e 21h durante o inverno e entre 6h e 8h durante o verão. De forma geral, os valores médios de ACI são superiores no inverno (Figura 8). Ao analisar os maiores valores de ACI para as estações de primavera e outono, nota-se que este índice atingiu seus picos nos períodos entre 12h e 14h e entre 19h e 21h, respectivamente. No entanto, foi durante ambas as manhãs que ocorreram as maiores emissões de sons pelos peixes teleósteos.

Embora o Índice de Complexidade Acústica (ACI) seja amplamente utilizado na avaliação de paisagens acústicas subaquáticas, Bolgan et al. (2018) ressaltaram a necessidade de cautela ao aplicá-lo. No referido estudo, os valores de ACI em comunidades com peixes sonoros não revelaram diferenças significativas entre a diversidade e a abundância de sons. Entretanto, nossas observações contradizem esse achado em duas estações do ano: verão e inverno. Os maiores valores de ACI foram associados aos períodos que registraram maior quantidade de sinais acústicos individualizados, ou seja, durante a manhã de verão e a noite de

inverno. É importante destacar que o coro dos peixes ocorreu predominantemente durante o período noturno em ambas as estações. Portanto, a análise das variações do ACI ao longo do dia pode não refletir adequadamente a diversidade sonora real, especialmente considerando a influência de espécies altamente sonoras, como é o caso do coro dos peixes.

Siddagangaiah e colaboradores (2019) observaram que o ACI aumentou durante atividades leves de coro, mas diminuiu à medida que o coro se intensificou. Assim, conclui-se que, no inverno, a atividade de coro é menos intensa que no verão. No entanto, é importante investigar a composição e intensidade do coro dos peixes teleósteos para entender a relação entre esse fenômeno sonoro e o índice de complexidade acústica.

Para avaliar a homogeneidade das variâncias do índice de complexidade acústica (ACI) entre os períodos do dia em cada estação, realizamos o teste de Levene. No inverno, o valor de p foi 0,02004, e no verão foi de 5,807e-05. Um valor de $p < 0,05$ sugere falta de homogeneidade dos dados. Assim, nossos dados não são homogêneos para o inverno. Para a primavera e outono, os valores de p foram superiores a 0,05, indicando homogeneidade dos dados. No entanto, o teste estatístico de Shapiro-Wilk mostrou que os dados não seguem uma distribuição normal para a primavera ($p = 0,0004$) e o outono ($p = 4.889e-05$).

Em seguida, conduzimos o teste de Kruskal-Wallis para investigar diferenças significativas nos valores de ACI entre as estações e períodos do dia. No inverno, verificamos um valor de p de 1,409e-14; no verão, 0,004392; na primavera, zero e no outono, 0,88. Concluimos que há diferenças estatisticamente significativas entre os grupos, exceto para os períodos do dia do outono, onde não há diferença estatística nos valores de ACI.

O teste de comparações múltiplas de Dunn, um procedimento pós-teste aplicado ao Kruskal-Wallis, foi usado para avaliar as diferenças entre os períodos do dia em amostras individuais. No inverno, não encontramos diferenças significativas nos valores de ACI, exceto entre os períodos de 6h-8h e 19h-21h, quando houve mais emissões de sons, incluindo o coro

dos peixes, à noite. Isso sugere que a complexidade acústica destes períodos é similar, enquanto os outros períodos apresentaram diferenças significativas entre si. No verão, foram identificadas diferenças significativas entre a manhã (6h-8h) e os outros períodos. Para a primavera, não houve diferenças entre 12h-14h e 16h-18h e entre 6h-8h e 16h-18h. Como mencionado anteriormente, não houve diferenças estatísticas entre os períodos do dia no outono, indicando que a complexidade acústica é semelhante em todos os períodos.

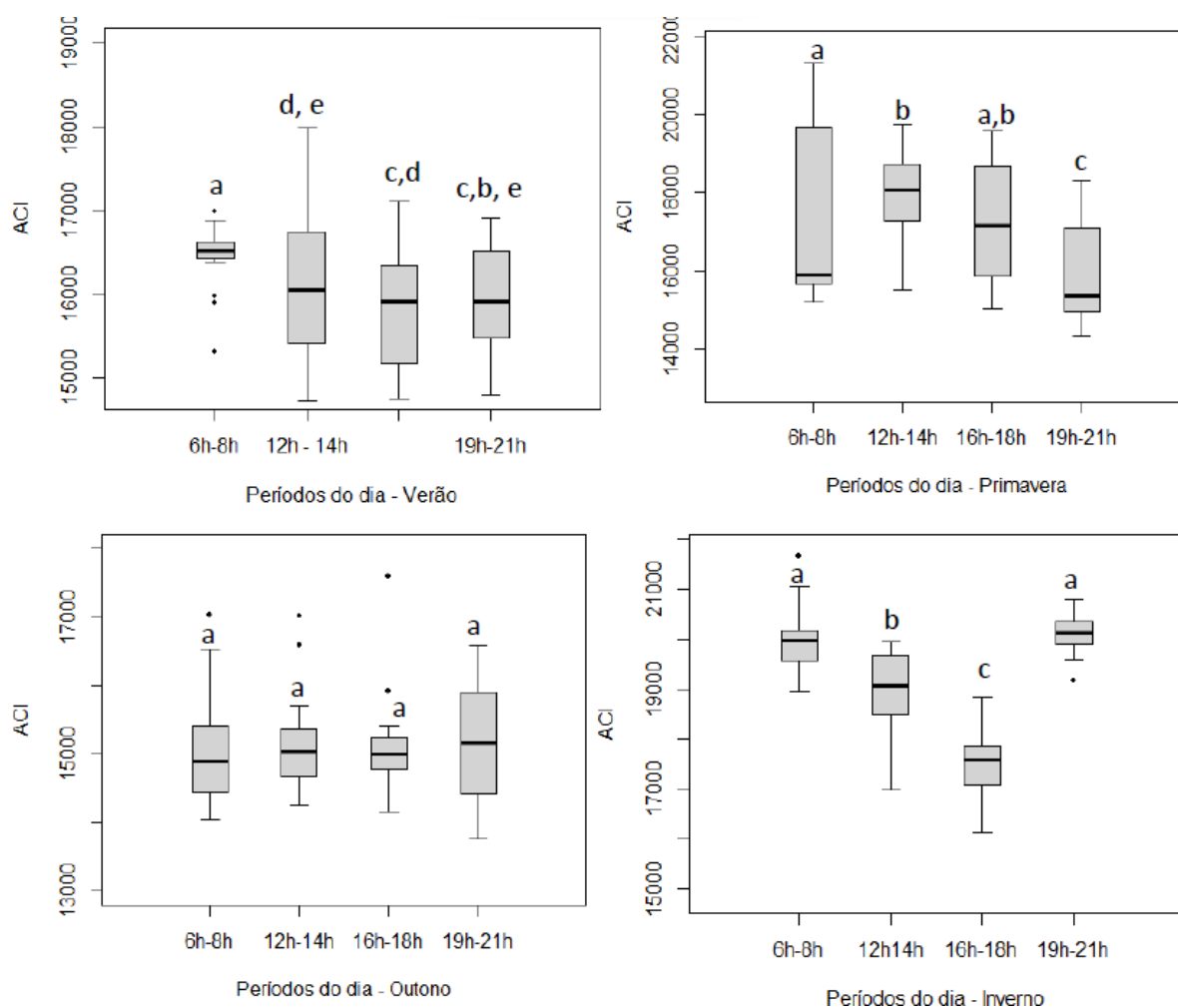


Figura 8: Variabilidade dos valores de ACI registrados nas amostras de sons coletados, para todos os períodos e estações. Os pequenos pontos pretos indicam os outliers. As letras indicam diferenças estatística significativas, com teste de Dunn.

O mesmo procedimento estatístico foi executado para investigar semelhanças e diferenças em cada período do dia ao longo das estações do ano. Os resultados estão representados nos gráficos da Figura 9, revelando poucas similaridades estatísticas entre eles.

Ao analisar a manhã, das 6h às 8h, ao longo de um ano, observamos que as estações de verão e primavera se mostram similares. Durante este intervalo, ambas estações registraram um maior número de emissão de sons de peixes teleósteos, sendo no verão que o ACI atinge sua média mais elevada. Algumas horas mais tarde, entre 12h e 14h, o inverno apresenta similaridades estatísticas com a primavera, que agora mostra sua maior média para os valores de ACI. Mais adiante, entre 16h e 18h, a primavera e o inverno continuam a demonstrar resultados semelhantes. É importante destacar que as outras estações se distinguem. No último período avaliado, das 19h às 21h, a primavera e o outono se assemelham, assim como a primavera e o verão. Esses resultados indicam a inexistência de um padrão entre o período do dia e os valores médios de ACI ao longo de um ano.

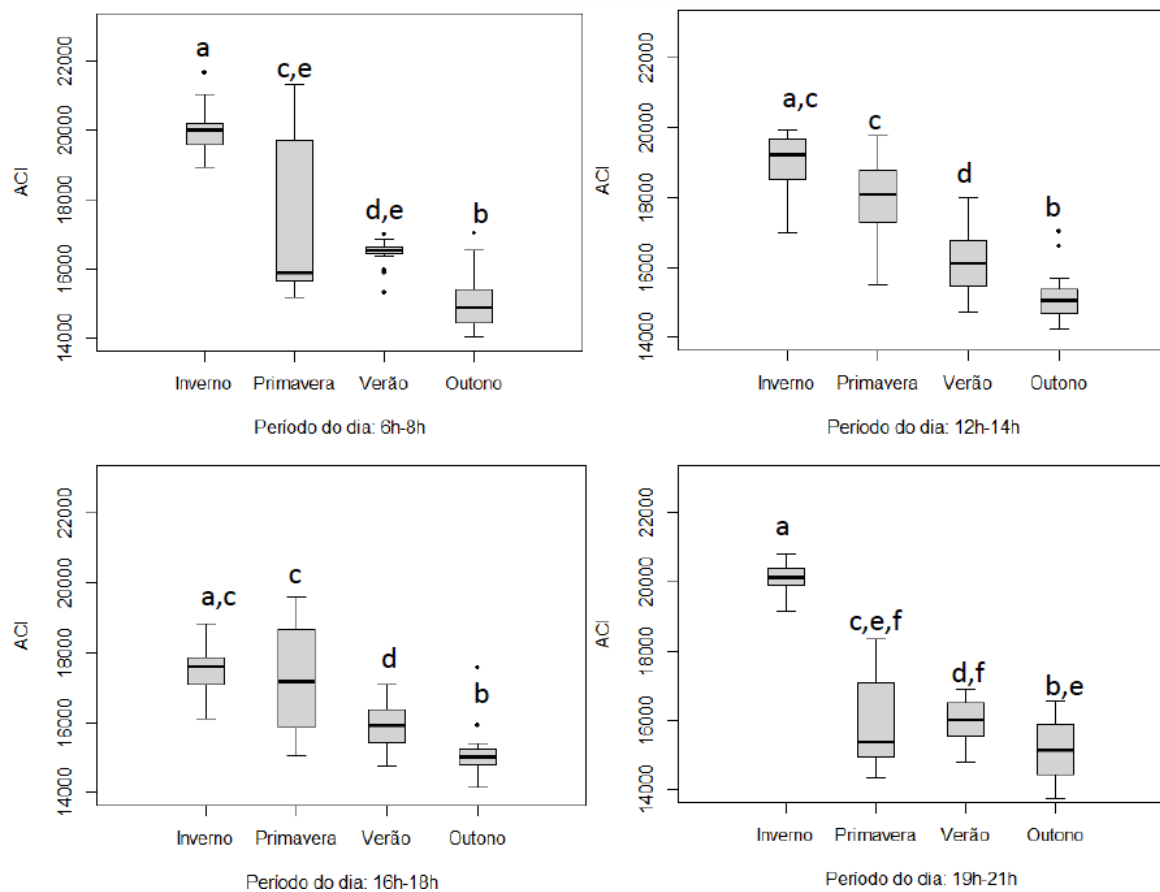


Figura 9: Variabilidade dos valores de ACI registrados nas amostras de sons coletados, para todos os períodos entre as estações do ano. Os pequenos pontos pretos indicam os outliers. As letras indicam diferenças estatística significativas, com teste de Dunn.

Em relação ao índice H (entropia acústica), que reflete a uniformidade da amplitude de um sinal ao longo do tempo e em toda a faixa de frequência (Harris et al. 2016), este índice mostrou valores mais altos pela manhã durante o inverno, seguido pela manhã do verão, primavera e outono (Figura 10).

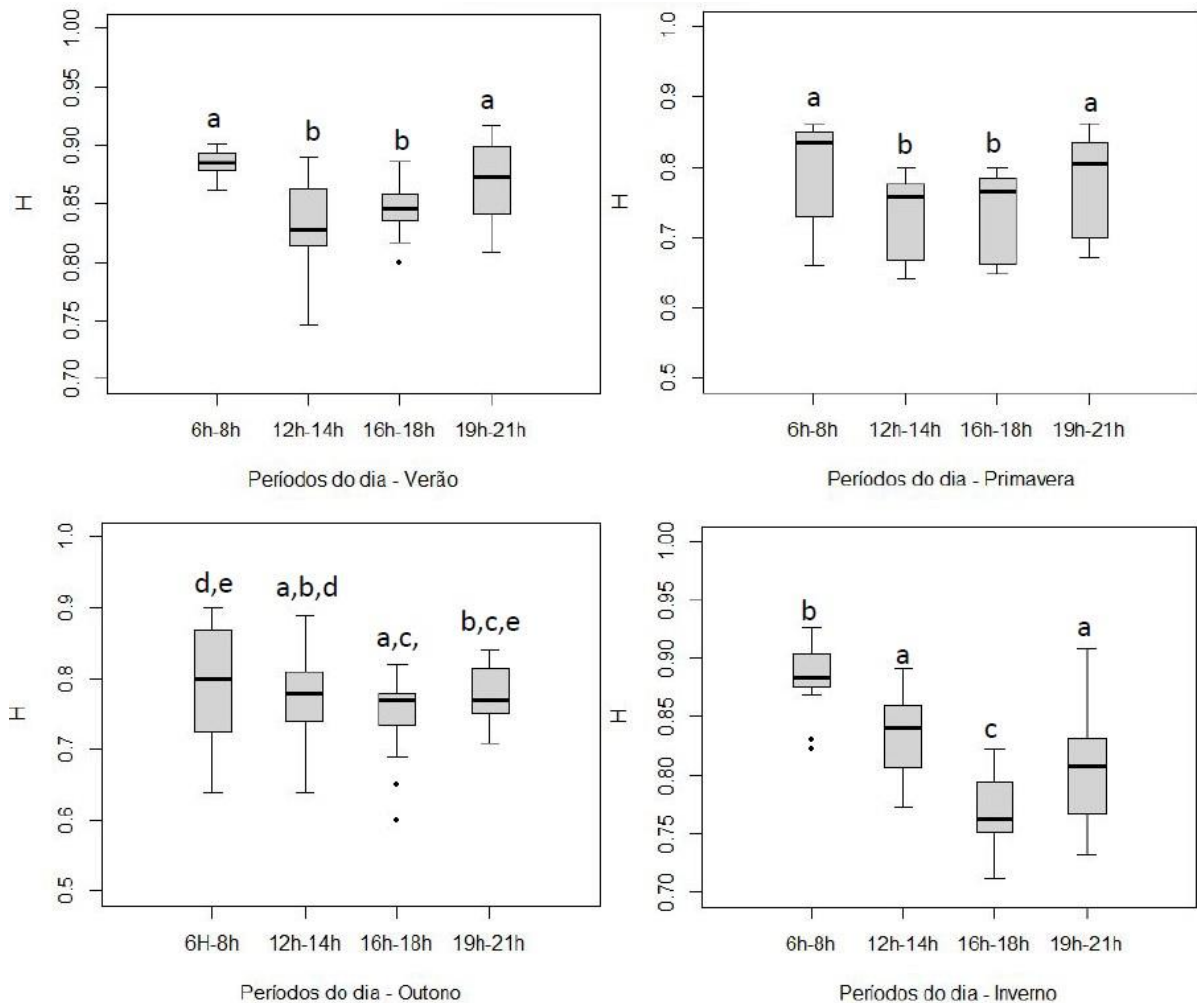


Figura 10: Variabilidade dos valores de H registrados nas amostras de sons coletados, para todos os períodos e estações. Os pequenos pontos pretos indicam os outliers. As letras indicam diferenças estatística significativas, com teste de Dunn.

Intuitivamente, esperava-se que os valores de H fossem mais altos durante a noite devido à presença do coro dos peixes. No entanto, este índice se baseia no índice de diversidade de Shannon, indicando que períodos com um tipo predominante de som tendem a ter menor diversidade acústica do que períodos com variação na paisagem sonora (Sueur et al. 2014).

Assim, a entropia de Shannon é usada em índices acústicos para abordar a heterogeneidade dos sons (Siddagangaiah et al. 2015).

As maiores médias nos valores de H foram observadas pela manhã, corroborando o propósito do índice H. Exceto pelo inverno, as manhãs das outras estações do ano foram os períodos do dia com mais emissões de sons pelos peixes, assim como os períodos em que o índice de entropia atingiu suas maiores médias. Nota-se que, apesar de a noite de inverno apresentar maior número de emissões de sons, foi neste período que houve a presença de coro dos peixes.

No estudo de Siddagangaiah e colaboradores (2019), o índice H foi correlacionado negativamente com o coro dos peixes. O índice atingiu menores valores conforme aumentava a presença do coro desses animais. Portanto, pode-se indicar que o índice de entropia acústica, neste estudo, revelou sua potencial utilidade para avaliar sinais biológicos pulsados de peixes dentro de um conjunto de dados.

Os valores do índice H exibiram variâncias homogêneas, conforme indicado pelo teste de Levene ($p=0,0627$), tanto no inverno, quanto na primavera, com p valores de 0,773. No entanto, o teste de Shapiro-Wilk, usado para avaliar a normalidade da distribuição de dados, resultou em $p=0,01889$ para o inverno e $p= 0,00013$ para a primavera, sugerindo uma distribuição não normal dos dados. Posteriormente, o teste de Kruskal-Wallis, revelou diferenças nos valores de H entre os períodos do dia em ambas as estações (Figura 11). O teste de Dunn indicou que, no inverno, não houve diferenças entre os períodos das 19h-21h e 12h-14h, enquanto na primavera não houve diferenças entre os períodos 12h-14h e 16h-18h, e 6h-8h e 19h-21h.

No verão e no outono, os valores de H não exibiram variâncias homogêneas ($p=4,65e-06$ e $p= 0,012$, respectivamente), com o teste de Kruskal-Wallis mostrando diferenças nos períodos do dia nessas estações. O teste de Dunn não detectou diferenças entre os pares de

período: 16h-18h e 12h-14h, assim como entre 6h-8h e 19-21h, para o verão. No outono, apenas os períodos entre 16h-18h e 6h-8h foram estatisticamente diferentes, indicando similaridade estatística em todas as outras duplas.

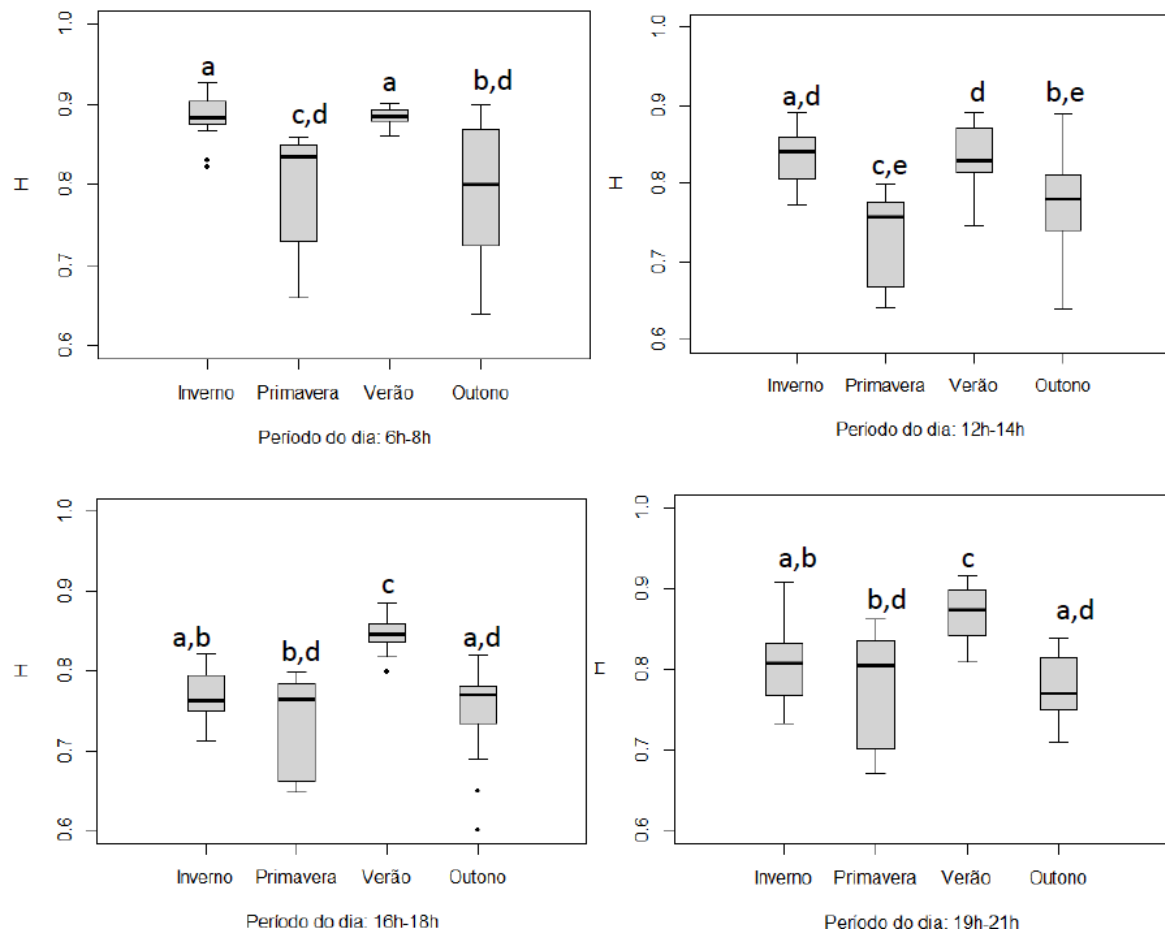


Figura 11: Variabilidade dos valores de H registrados nas amostras de sons coletados, para todos os períodos entre as estações do ano. Os pequenos pontos pretos indicam os outliers. As letras indicam diferenças estatística significativas, com teste de Dunn.

Analisando as semelhanças dentro de cada estação do ano para cada período, e comparando-os em relação aos valores médios de H, observamos que as manhãs de inverno e verão, e as manhãs de outono e primavera são semelhantes. No período da tarde, (12h - 14h), as mesmas estações indicam similaridade nos valores de entropia acústica, enquanto as outras estações diferem entre si. No período vespertino (16-18h), e noturno (19h-21h), outono e primavera são semelhantes, assim como inverno e outono e, inverno e primavera.

Observamos que o outono e a primavera, mantêm-se semelhantes ao longo de um ano em relação ao índice de entropia acústica H , o que pode implicar em uma semelhança da diversidade de peixes teleósteos na Baía do Flamengo, em ambas as estações do ano. Apesar dos índices acústicos mostrarem resultados rápidos e fáceis, que buscam estimar a biodiversidade e resumir as características acústicas do local, eles não identificam sons em nível de espécies (Llusia, 2024). A avaliação e a comparação da biodiversidade através do emprego exclusivo dos índices acústicos é limitante. De acordo com Sethi e colaboradores (2023), os índices acústicos são ferramentas que devem ser utilizadas em abordagens preliminares, que fomentarão o uso de instrumentos mais eficazes para a avaliação da biodiversidade, principalmente quando relacionados a dados de monitoramento acústico em grande escala. Assim, os índices acústicos têm a capacidade de direcionar os estudos para pontos focais que foram avaliados previamente.

Pesquisas recentes (Sethi et al, 2023; Bicudo et al, 2023) abordaram inconsistências nos estudos de biodiversidade baseados nos índices acústicos. Eles revelaram fraco desempenho da ferramenta e apontaram a interferência do ruído e a contribuição desigual das espécies, como fatores limitantes para confiabilidade dos índices (Llusia, 2024). É um desafio extrair informação biológica a partir de uma série temporal de gravações. Dessa forma, os resultados aqui expostos mostram um cenário amplo de similaridade na biodiversidade entre as estações do ano, que ainda carecem de avaliação adicional, como por exemplo observações visuais, manipulação dos animais ou uso de algoritmos de aprendizado de máquina para identificação acústica de espécies e monitoramento preciso da biodiversidade.

Ressalta-se que o estudo de Llusia (2024) foi recentemente incorporado à literatura do atual projeto, e se tornou fundamental para entender o comportamento dos índices acústicos na avaliação da biodiversidade na Baía do Flamengo.

4.5. Divulgação dos dados através de uma biblioteca digital

Atualmente, há diversos repositórios de áudio, que oferecem vastos inventários globais de pesquisas sobre produção sonora de peixes, disponibilizados por museus ou centros de pesquisa internacionais, como o FishSounds [<https://fishsounds.net/index.js/>], o Discovery of the Sound in the Sea [<https://dosits.org>] e a Biblioteca Macaulay da Universidade de Cornell, EUA [<https://www.macaulaylibrary.org/>].

O FishSounds compila gravações de sons de peixes disponibilizadas por pesquisadores, bem como informações publicadas em artigos revisados, relatórios, anais de conferências, livros, teses e dissertações, com data até dezembro de 2021. O repositório visa criar um sistema de usuário para registro e envio de dados, já que atualmente os pesquisadores que desejam divulgar suas gravações precisam contatar o repositório por e-mail. Seu banco de dados tem como objetivo contribuir para o avanço na investigação do comportamento dos peixes, e para o monitoramento dos impactos humanos nas paisagens sonoras subaquáticas. Vale ressaltar sua colaboração com o FishBase, o que permite troca e complementação de dados. O FishBase ainda é a fonte principal de informações sobre as espécies de peixes emissoras de sons.

Por outro lado, o Discovery of the Sounds in the Sea (DOSITS), é um projeto científico que sintetiza as mais recentes pesquisas sobre acústica subaquática. Seu website permite ouvir e ler sobre os sons emitidos por peixes e outros animais marinhos, embora tenha um repertório um pouco mais limitado que o FishSounds. O DOSITS é ideal para investigar sons do ambiente marinho e aprender sobre diversos temas dessa área, e ele também permite o envio de dados por pesquisadores e grupos de pesquisas. A Biblioteca Macaulay da Universidade de Cornell apresenta o maior acervo científico de áudio do mundo, inicialmente focado em aves, mas já contendo coleções de sons de peixes. Sua contribuição de sons de teleósteos ocorre mediante análise e discussão interna sobre o arquivamento do áudio na plataforma.

Observa-se que todos os sons de peixes inseridos nessas plataformas são de espécies já identificadas e reconhecidas. Em nosso estudo na Baía do Flamengo, não identificamos, em nível de espécie, os sons emitidos pelos teleósteos. No entanto, o banco de dados atual apresenta informações anteriormente desconhecidas para a área. Amostras dos sinais acústicos, contendo descrição do local, hora e data da gravação, foram separadas e armazenadas na nuvem para disponibilização à comunidade científica e aos estudiosos da bioacústica. Entramos em contato com o FishSounds e a Biblioteca Macaulay, para verificar o interesse deles nos sons encontrados neste projeto. Entretanto, até a finalização do projeto, não houve retorno. Esses sinais acústicos e suas características podem ser utilizados como referências para estudos futuros e comparações com outros pontos de amostragem no litoral de São Paulo e do Brasil.

5. Considerações Finais

Em um amplo contexto, com foco na diversidade de peixes teleósteos na Baía do Flamengo, os dados indicaram que esses animais foram mais ativos durante o verão do que em outras estações, devido ao aumento das emissões de sinais acústicos nesse período. O índice de entropia (H) sustenta parcialmente essa conclusão, já que a média dos valores de H foi mais alta no verão, embora tenha atingido seu pico em uma manhã de inverno, superando todos os outros períodos do dia. Este índice revelou uma entropia acústica semelhante no outono e primavera. Os valores médios do índice de complexidade acústica (ACI) foram maiores no inverno, com o ápice durante a noite dessa estação, nas horas de coro.

A biofonia de peixes tem potencial de ser um proxy altamente adequado para analisar as tendências de biodiversidade no ecossistema marinho. Para isso, ferramentas como os índices acústicos são importantes para avaliar preliminarmente a biodiversidade, contribuindo para a compreensão do ecossistema que os peixes estão inseridos. A entropia acústica e a

complexidade acústica, índices utilizados neste estudo, mostraram-se eficazes e aplicáveis. No entanto, são necessários estudos adicionais para entender seu comportamento em relação a eventos de ruído e coro de peixes, visando sua aplicação em uma larga escala temporal mais ampla para monitorar o habitat em questão.

Outro ponto relevante para aumentar a compreensão da biodiversidade do local é a identificação dos sons em sua fonte. É crucial que as amostras de som sejam inicialmente correlacionadas com amostras visuais para atribuir um suposto significado comunicativo às categorias acústicas de uma espécie específica.

Observou-se que a temperatura pode influenciar a emissão de sons das espécies de teleósteos na Baía do Flamengo, assim como o ciclo lunar pode ter uma certa influência sobre a periodicidade vocal destes animais em Ubatuba. Uma distribuição sonora ao longo do espaço e tempo, através de uma varredura contínua de 24 horas que contemple os diferentes ciclos lunares, aumentaria o conhecimento sobre o comportamento vocal das espécies de teleósteos.

Em uma região com interesses econômicos, recreativos e de preservação, descrever e quantificar a biodiversidade da região é essencial para uma melhor gestão da relação humano-natureza. Estudos de ecologia acústica para avaliar ambientes aquáticos ainda são incipientes no Brasil, e este estudo pode impulsionar essa área de pesquisa, abrindo portas para futuros trabalhos e para o entendimento da dinâmica populacional de teleósteos em Ubatuba. Por fim, destaca-se a importância do PAM, uma ferramenta não invasiva fundamental para o monitoramento de paisagens acústicas subaquáticas, que fornece informações em escalas temporais e espaciais suficientes para compreender o ambiente em que os animais estão inseridos e suas interações com outros componentes da paisagem acústica. A ferramenta tem capacidade de prover o entendimento sobre a comunicação sonora destes animais, assim como auxilia na compreensão de como os fatores bióticos e abióticos podem influenciar no comportamento acústico dos teleósteos.

6. Literatura citada

- Ab'Saber, A. N. (1955). Contribuição à geomorfologia do litoral paulista. *Revista Brasileira de Geografia*, 17(1), 3-48.
- Amorim, M. C. P. (2006). Diversity of sound production in fish. *Communication in fishes*, 1, 71-104.
- Appeldoorn-Sanders, E., Schärer-Umpierre, M. T., & Cruz-Motta, J. J. (2022). Passive acoustics as a tool to quantify/characterize vessel activity at fish spawning aggregation sites. *Ocean & Coastal Management*, 226, 106270.
- Banse, M., Lecchini, D., Bertucci, F., & Parmentier, E. (2023). Reliable characterization of sound features in fishes begins in open-water environments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 154(1), 270-278.
- Bertucci, F., Ruppé, L., Van Wassenbergh, S., Compère, P., & Parmentier, E. (2014). New insights into the role of the pharyngeal jaw apparatus in the sound-producing mechanism of *Haemulon flavolineatum* (Haemulidae). *Journal of Experimental Biology*, 217(21), 3862-3869.
- Bicudo, T., Llusia, D., Anciães, M., & Gil, D. (2023). Poor performance of acoustic indices as proxies for bird diversity in a fragmented Amazonian landscape. *Ecological Informatics*, 77, 102241.
- Bittencourt, L., Barbosa, M., Secchi, E., Lailson-Brito Jr, J., & Azevedo, A. (2016). Acoustic habitat of an oceanic archipelago in the Southwestern Atlantic. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 115, 103-111.
- Bittencourt, L., Barbosa, M., Fernandes, M., Bisi, T. L., Lailson-Brito, J., & Azevedo, A. F. (2023). Fish chorus variation in a tropical estuarine environment. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 154(5), 3158-3167.
- Bolgan, M., Di Iorio, L., Dailianis, T., Catalan, I. A., Lejeune, P., Picciulin, M., & Parmentier, E. (2022). Fish acoustic community structure in Neptune seagrass meadows across the Mediterranean basin. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 32(2), 329-347.
- Bolgan, M., Gervaise, C., Di Iorio, L., Lossent, J., Lejeune, P., Raick, X., & Parmentier, E. (2020). Fish biophony in a Mediterranean submarine canyon. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 147(4), 2466-2477.

- Borie, A., Mok, H. K., Chao, N. L., & Fine, M. L. (2014). Spatiotemporal variability and sound characterization in Silver Croaker *Plagioscion squamosissimus* (Sciaenidae) in the Central Amazon. *PloS one*, 9(8), e99326.
- Borie, A., Rezende, S. M., Ferreira, B. P., Maida, M., Radford, C., & Travassos, P. (2021). Soundscape of protected and unprotected tropical Atlantic coastal coral reefs. *Scientia Marina*, 85(1), 5-14.
- Borie-Mojica, A., Rezende, S. M., Padovani Ferreria, B., Maida, M., & Travassos, P. (2022). Fish chorus and vessel noise in a marine protected coastal reef vary with lunar phase. *Environmental Biology of Fishes*, 105(5), 575-587.
- Breder, C. V. (1967). Seasonal and diurnal occurrences of sound production in a small Florida bay. *Bull. Am. Mus. Nat. Hist*, 138, 329-378.
- Carriço, R., Silva, M. A., Menezes, G. M., Fonseca, P. J., & Amorim, M. C. P. (2019). Characterization of the acoustic community of vocal fishes in the Azores. *PeerJ*, 7, e7772.
- Ceraulo, M., Sal Moyano, M. P., Bazterrica, M. C., Hidalgo, F. J., Papale, E., Grammauta, R., ... & Buscaino, G. (2020). Spatial and temporal variability of the soundscape in a Southwestern Atlantic coastal lagoon. *Hydrobiologia*, 847, 2255-2277.
- Colleye, O., Vandewalle, P., Lanterbecq, D., Lecchini, D., & Parmentier, E. (2011). Interspecific variation of calls in clownfishes: degree of similarity in closely related species. *BMC evolutionary biology*, 11(1), 1-9.
- Connaughton, M. A., & Taylor, M. H. (1995). Seasonal and daily cycles in sound production associated with spawning in the weakfish, *Cynoscion regalis*. *Environmental Biology of Fishes*, 42(3), 233-240.
- Costa-Neto, E. M., & Marques, J. G. W. (2000). Ethnoichthyology of artisan fishermen from Siribinha, municipality of Conde (Bahia): aspects related to the ethology of fishes. *Acta Scientiarum*, 22(2), 553-560.
- Desiderà, E., Guidetti, P., Panzalis, P., Navone, A., Valentini-Poirrier, C. A., Boissery, P., & Di Iorio, L. (2019). Acoustic fish communities: sound diversity of rocky habitats reflects fish species diversity. *Marine Ecology Progress Series*, 608, 183-197.
- Discovery of Sounds in the Sea. *Audio Gallery*. Acesso em 20 out. 2021. Disponível em <https://dosits.org/>

- Evans, R. R. (1973). The swimbladder and associated structures in western Atlantic sea robins (Triglidae). *Copeia*, 315-321.
- Farina, A. (2014). Soundscape and landscape ecology. In *Soundscape ecology* (pp. 1-28). Springer, Dordrecht.
- Fine, M. L., King, C. B., & Cameron, T. M. (2009). Acoustical properties of the swimbladder in the oyster toadfish *Opsanus tau*. *Journal of Experimental Biology*, 212(21), 3542-3552.
- Fine, M. L., & Parmentier, E. (2015). Mechanisms of fish sound production. In *Sound communication in fishes* (pp. 77-126). Springer, Vienna.
- Fine, M. L., & Thorson, R. F. (2008). Use of passive acoustics for assessing behavioral interactions in individual toadfish. *Transactions of the American Fisheries Society*, 137(2), 627-637.
- Fine, M. L., Friel, J. P., McElroy, D., King, C. B., Loesser, K. E., & Newton, S. (1997). Pectoral spine locking and sound production in the channel catfish *Ictalurus punctatus*. *Copeia*, 777-790.
- Fish, M. P. (1954). *The character and significance of sound production among fishes of the western North Atlantic* (Vol. 14). New Haven (CT): Bingham Oceanographic Laboratory.
- Fish, J. F., & Cummings, W. C. (1972). A 50-dB increase in sustained ambient noise from fish (*Cynoscion xanthulus*). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 52(4B), 1266-1270.
- Fish, M. P., & Mowbray, W. H. (1970). *Sounds of western North Atlantic fishes. A reference file of biological underwater sounds*. Rhode Island Univ Kingston Narragansett Marine Lab.
- Fundação Florestal (2020). Plano de Manejo da Área de Proteção Ambiental Marinha do Litoral Norte. Fundação Florestal. SMA-SP.
- Ghahramani, Z. N., Mohajer, Y., & Fine, M. L. (2014). Developmental variation in sound production in water and air in the blue catfish *Ictalurus furcatus*. *Journal of Experimental Biology*, 217(23), 4244-4251.
- Green, J. M. (1971). Studies on the swim bladders of *Eucinostomus gula* and *E. argenteus* (Pisces: Gerridae). *Bulletin of Marine Science*, 21(2), 567-590.
- Harris, S. A., Shears, N. T., & Radford, C. A. (2016). Ecoacoustic indices as proxies for biodiversity on temperate reefs. *Methods in Ecology and Evolution*, 7(6), 713-724.

- Helfman, G. S. (1986). Fish behaviour by day, night and twilight. In *The behaviour of teleost fishes* (pp. 366-387). Boston, MA: Springer US.
- Helfman, G. S., Collette, B. B., Facey, D. E., & Bowen, B. W. (2009). *The diversity of fishes: biology, evolution, and ecology*. John Wiley & Sons.
- Kaschner, K. 2012. The SOUNDS table in FishBase. FishBase (R. Froese and D. Pauly). World Wide Web electronic publication, www.fishbase.org, version (08/2012).
- Kratochvil, H. (1985). Beiträge zur Lautbiologie der Anabantoidei—Bau Funktion und Entwicklung von lauterzeugenden Systemen. *Zoologische Jahrbücher. Abteilung für allgemeine Zoologie und Physiologie der Tiere*, 89(2), 203-255.
- Koenig, C. C., Bueno, L. S., Coleman, F. C., Cusick, J. A., Ellis, R. D., Kingon, K., ... & Stallings, C. D. (2017). Diel, lunar, and seasonal spawning patterns of the Atlantic goliath grouper, *Epinephelus itajara*, off Florida, United States. *Bulletin of Marine Science*, 93(2), 391-406.
- Ladich, F., Bischof, C., Schleinz, G., & Fuchs, A. (1992). Intra-and interspecific differences in agonistic vocalization in croaking gouramis (genus: *Trichopsis*, Anabantoidei, Teleostei). *Bioacoustics*, 4(2), 131-141.
- Ladich, F. (Ed.). (2015). *Sound communication in fishes* (Vol. 4). Springer.
- Ladich, F. (2014). Fish bioacoustics. *Current opinion in neurobiology*, 28, 121-127.
- Lagardère, J. P., & Ernande, B. (2004). Sounds recorded in salt marshes and attributed to the European eel. *Comptes rendus biologies*, 327(4), 353-359.
- Lançone, R. B., Duleba, W., & Mahiques, M. D. (2005). Dinâmica de fundo da Enseada do Flamengo, Ubatuba, Brasil, inferida a partir da distribuição espacial, morfometria e tafonomia de foraminíferos. *Revista brasileira de Paleontologia*, 8(3), 181-192.
- Llusia, D. (2024). The limits of acoustic indices. *Nature Ecology & Evolution*, 1-2.
- Lobel PS. 1978. Diel, lunar, and seasonal periodicity in the reproductive behavior of the pomacanthid fish, *Centropyge potteri*, and some other reef fishes in Hawaii. *Pac Sci* 32(2): 193-207.
- Looby A, Vela S, Cox K, Riera A, Spriel B, Davies HL, Bravo S, Rountree R, Juanes F, Reynolds LK, Martin CW. 2024. Sons de peixe. <http://www.fishsounds.net>, versão 2.2.

- Looby A, Riera A, Vela S, Cox K, Bravo S, Rountree R, Juanes F, Reynolds LK, Martin CW (2022) *FishSounds*. <http://www.fishsounds.net>, version 1.1. Acesso em 24 de maio de 2022.
- Locascio, J. V., & Burton, M. L. (2016). A passive acoustic survey of fish sound production at Riley's Hump within Tortugas South Ecological Reserve: implications regarding spawning and habitat use.
- Luczkovich, J. J., Sprague, M. W., Johnson, S. E., & Pullinger, R. C. (1999). Delimiting spawning areas of weakfish *Cynoscion regalis* (family Sciaenidae) in Pamlico Sound, North Carolina using passive hydroacoustic surveys. *Bioacoustics*, 10(2-3), 143-160.
- Luczkovich, J. J., Mann, D. A., & Rountree, R. A. (2008). Passive acoustics as a tool in fisheries science. *Transactions of the American Fisheries Society*, 137(2), 533-541.
- Lugli, M. (2010). Sounds of shallow water fishes pitch within the quiet window of the habitat ambient noise. *Journal of Comparative Physiology A*, 196(6), 439-451.
- The Cornell Lab of Ornithology. *Macaulay Library*. Acesso em 20 out. 2021. Disponível em <https://www.macaulaylibrary.org/>
- Mann, D. A., & Lobel, P. S. (1995). Passive acoustic detection of sounds produced by the damselfish, *Dascyllus albisella* (Pomacentridae). *Bioacoustics*, 6(3), 199-213.
- Mann, D. A., & Grothues, T. M. (2009). Short-term upwelling events modulate fish sound production at a mid-Atlantic Ocean observatory. *Marine Ecology Progress Series*, 375, 65-71.
- Maruska, K. P., Boyle, K. S., Dewan, L. R., & Tricas, T. C. (2007). Sound production and spectral hearing sensitivity in the Hawaiian sergeant damselfish, *Abudefduf abdominalis*. *Journal of Experimental Biology*, 210(22), 3990-4004.
- Mattox, G. M. T., Gondolo, G. F., & Cunningham, P. T. M. (2014). Long-term variation in the ichthyofauna of Flamengo Cove, Ubatuba, São Paulo. *Arquivos de Zoologia*, 45, 51-61.
- McCauley, R. (2012). Fish choruses from the Kimberley, seasonal and lunar links as determined by long term sea noise monitoring. *Proceedings of the Acoustical Society of Australia*.
- McWilliam, J. N., McCauley, R. D., Erbe, C., & Parsons, M. J. (2017). Patterns of biophonic periodicity on coral reefs in the Great Barrier Reef. *Scientific Reports*, 7(1), 17459.

- Millot, S., Vandewalle, P., & Parmentier, E. (2011). Sound production in red-bellied piranhas (*Pygocentrus nattereri*, Kner): an acoustical, behavioral and morphofunctional study. *Journal of Experimental Biology*, 214(21), 3613-3618.
- Mok, H. K., & Gilmore, R. G. (1983). Analysis of sound production in estuarine aggregations of *Pogonias cromis*, *Bairdiella chrysoura*, and *Cynoscion nebulosus* (Sciaenidae). *Bulletin of the Institute of Zoology, Academia Sinica*.
- Monczak, A., McKinney, B., Souiedan, J., Marian, A. D., Seder, A., May, E., ... & Montie, E. W. (2022). Sciaenid courtship sounds correlate with juvenile appearance and abundance in the May River, South Carolina, USA. *Marine Ecology Progress Series*, 693, 1-17.
- Montie, E. W., Vega, S., & Powell, M. (2015). Seasonal and spatial patterns of fish sound production in the May River, South Carolina. *Transactions of the American Fisheries Society*, 144(4), 705-716.
- Noda, J. J., Travieso, C. M., & Sánchez-Rodríguez, D. (2016). Automatic taxonomic classification of fish based on their acoustic signals. *Applied Sciences*, 6(12), 443.
- Parmentier, E., Bertucci, F., Bolgan, M., & Lecchini, D. (2021). How many fish could be vocal? An estimation from a coral reef (Moorea Island). *Belgian Journal of Zoology*, 151, 82.
- Parmentier, E., Bouillac, G., Dragičević, B., Dulčić, J., & Fine, M. (2010). Call properties and morphology of the sound-producing organ in *Ophidion rochei* (Ophidiidae). *Journal of Experimental Biology*, 213(18), 3230-3236.
- Parmentier, E., Tock, J., Falguière, J. C., & Beauchaud, M. (2014). Sound production in *Sciaenops ocellatus*: preliminary study for the development of acoustic cues in aquaculture. *Aquaculture*, 432, 204-211.
- Parmentier, E., Di Iorio, L., Picciulin, M., Malavasi, S., Lagardère, J. P., & Bertucci, F. (2018). Consistency of spatiotemporal sound features supports the use of passive acoustics for long-term monitoring. *Animal Conservation*, 21(3), 211-220.
- Pijanowski, B. C., Farina, A., Gage, S. H., Dumyahn, S. L., & Krause, B. L. (2011). What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science. *Landscape ecology*, 26(9), 1213-1232.
- Popper, A. N., & Hawkins, A. D. (2019). An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes. *Journal of fish biology*, 94(5), 692-713.
- Protasov, V. R., & Romanenko, E. V. (1962). Sounds Emitted by Some Fish, and Their Signal Importance. *Zool. Zh*, 41(10), 1516-1528.

- Rice, A. N., Morano, J. L., Hodge, K. B., & Muirhead, C. A. (2016). Spatial and temporal patterns of toadfish and black drum chorusing activity in the South Atlantic Bight. *Environmental biology of fishes*, 99, 705-716.
- Rountree, R. A., Juanes, F., Goudey, C. A., & Ekstrom, K. E. (2012). Is biological sound production important in the deep sea?. In *The effects of noise on aquatic life* (pp. 181-183). Springer, New York, NY.
- Rountree, R. A., Bolgan, M., & Juanes, F. (2019). How can we understand freshwater soundscapes without fish sound descriptions?. *Fisheries*, 44(3), 137-143.
- Rowell, T. J., Schärer, M. T., Appeldoorn, R. S., Nemeth, M. I., Mann, D. A., & Rivera, J. A. (2012). Sound production as an indicator of red hind density at a spawning aggregation. *Marine Ecology Progress Series*, 462, 241-250.
- Ruppé, L., Clément, G., Herrel, A., Ballesta, L., Décamps, T., Kéver, L., & Parmentier, E. (2015). Environmental constraints drive the partitioning of the soundscape in fishes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(19), 6092-6097.
- Saucier, M. H., Baltz, D. M., & Roumillat, W. A. (1992). Hydrophone identification of spawning sites of spotted seatrout *Cynoscion nebulosus* (Osteichthyes: Sciaenidae) near Charleston, South Carolina. *Gulf of Mexico Science*, 12(2), 8.
- Saucier, M. H., & Baltz, D. M. (1993). Spawning site selection by spotted seatrout, *Cynoscion nebulosus*, and black drum, *Pogonias cromis*, in Louisiana. *Environmental biology of Fishes*, 36(3), 257-272.
- Sethi, S. S., Bick, A., Ewers, R. M., Klinck, H., Ramesh, V., Tuanmu, M. N., & Coomes, D. A. (2023). Limits to the accurate and generalizable use of soundscapes to monitor biodiversity. *Nature Ecology & Evolution*, 7(9), 1373-1378.
- Siddagangaiah, S., Li, Y., Guo, X., & Yang, K. (2015). On the dynamics of ocean ambient noise: Two decades later. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 25(10).
- Siddagangaiah, S., Chen, C. F., Hu, W. C., Danovaro, R., & Pieretti, N. (2021). Silent winters and rock-and-roll summers: The long-term effects of changing oceans on marine fish vocalization. *Ecological Indicators*, 125, 107456.
- Siddagangaiah, S., Chen, C. F., Hu, W. C., & Pieretti, N. (2019). A complexity-entropy based approach for the detection of fish choruses. *Entropy*, 21(10), 977.

- Simpson, S. D., Radford, A. N., Nedelec, S. L., Ferrari, M. C., Chivers, D. P., McCormick, M. I., & Meekan, M. G. (2016). Anthropogenic noise increases fish mortality by predation. *Nature communications*, 7(1), 1-7.
- Smith, M. E., Weller, K. K., Kynard, B., Sato, Y., & Godinho, A. L. (2018). Mating calls of three prochilodontid fish species from Brazil. *Environmental biology of fishes*, 101(2), 327-339.
- Sueur, J., Aubin, T., & Simonis, C. (2008). Seewave, a free modular tool for sound analysis and synthesis. *Bioacoustics*, 18(2), 213-226.
- Sueur, J., & Farina, A. (2015). Ecoacoustics: the ecological investigation and interpretation of environmental sound. *Biosemiotics*, 8(3), 493-502.
- Sueur, J., Farina, A., Gasc, A., Pieretti, N., & Pavoine, S. (2014). Acoustic indices for biodiversity assessment and landscape investigation. *Acta Acustica united with Acustica*, 100(4), 772-781.
- Sueur, J., Krause, B., & Farina, A. (2021). Acoustic biodiversity. *Current Biology*, 31(19), R1172-R1173.
- Suthers, R. A., Fitch, W. T., Fay, R. R., & Popper, A. N. (Eds.). (2016). *Vertebrate sound production and acoustic communication*. New York: Springer International Publishing.
- Staaterman, E., Paris, C. B., DeFerrari, H. A., Mann, D. A., Rice, A. N., & D'Alessandro, E. K. (2014). Celestial patterns in marine soundscapes. *Marine Ecology Progress Series*, 508, 17-32.
- Tavolga, W. N. (1977). Mechanisms for directional hearing in the sea catfish (*Arius felis*). *Journal of Experimental Biology*, 67(1), 97-115.
- Tellechea, J. S., Martinez, C., Fine, M. L., & Norbis, W. (2010). Sound production in the whitemouth croaker and relationship between fish size and disturbance call characteristics. *Environmental biology of fishes*, 89(2), 163-172.
- Tellechea, J. S., Bouvier, D., & Norbis, W. (2011). Spawning sounds in whitemouth croaker (Sciaenidae): seasonal and daily cycles. *Bioacoustics*, 20(2), 159-168.
- Tellechea, J. S. (2019). The acoustic behavior of Southern King Weakfish (*Macrodon atricauda*-Sciaenidae). *Environmental Biology of Fishes*, 102(10), 1253-1264.

- Wall, C. C., Simard, P., Lembke, C., & Mann, D. A. (2013). Large-scale passive acoustic monitoring of fish sound production on the West Florida Shelf. *Marine Ecology Progress Series*, 484, 173-188.
- Wahlberg, M., & Westerberg, H. (2003). Sounds produced by herring (*Clupea harengus*) bubble release. *Aquatic Living Resources*, 16(3), 271-275.
- Wang, Z. T., Nowacek, D. P., Akamatsu, T., Wang, K. X., Liu, J. C., Duan, G. Q., & Wang, D. (2017). Diversity of fish sound types in the Pearl River Estuary, China. *PeerJ*, 5, e3924.
- Webb, J. F., Fay, R. R., & Popper, A. N. (Eds.). (2008). *Fish bioacoustics* (Vol. 32). Springer Science & Business Media.
- Winn, H. E. (1964). The biological significance of fish sounds. *Marine bio-acoustics*, 2, 213-231