



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA E EVOLUÇÃO

AMANDA DA SILVA SOUZA

**ESTRUTURA POPULACIONAL E BIOACUMULAÇÃO DE METAIS EM PEIXES
DE ÁREAS AFETADAS POR ÓLEO NO LITORAL BRASILEIRO**

FEIRA DE SANTANA, BAHIA

2023

AMANDA DA SILVA SOUZA

**ESTRUTURA POPULACIONAL E BIOACUMULAÇÃO DE METAIS EM PEIXES
DE ÁREAS AFETADAS POR ÓLEO NO LITORAL BRASILEIRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Evolução, Universidade Estadual de Feira de Santana, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ecologia e Evolução.

Orientador: Dr. Alexandre Clístenes de Alcântara Santos

Coorientadora: Dra. Taise Bomfim de Jesus

FEIRA DE SANTANA, BAHIA

2023

Ficha Catalográfica - Biblioteca Central Julieta Carteado - UEFS

Souza, Amanda da Silva
S713e Estrutura populacional e bioacumulação de metais em peixes de áreas afetadas por óleo no litoral brasileiro./ Amanda da Silva Souza, 2023.
75f.: il.

Orientador: Alexandre Clístenes de Alcântara Santos
Coorientadora: Taise Bomfim de Jesus
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Feira de Santana.
Programa, de Pós-Graduação em Ecologia e Evolução, Feira de Santana, 2023.

1.Contaminação - Petróleo. 2.Haemulon aurolineatum. 3.Lutjanus synagris. I.Santos, Alexandre Clístenes de Alcântara, orient. II.Jesus, Taise Bomfim de, coorient. III.Universidade Estadual de Feira de Santana.
IV. Título.

CDU: 504:597

Maria de Fátima de Jesus Moreira - Bibliotecária - CRB-5/1120

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **SORAIA BARRETO AGUIAR FONTELES**
Data: 10/11/2023 11:01:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Soraia Barreto Fonteles
(Universidade Federal do Recôncavo da Bahia)

Documento assinado digitalmente
 **CAROLINA OLIVEIRA DE SANTANA**
Data: 10/11/2023 13:24:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Carolina Oliveira de Santana
(Universidade Estadual de Feira de Santana)

Documento assinado digitalmente
 **ALEXANDRE CLISTENES DE ALCANTARA SANTO**
Data: 10/11/2023 10:56:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Alexandre Clistenes de Alcantara Santos (Universidade Estadual de Feira de Santana) Orientador e Presidente da Banca

AGRADECIMENTOS

Eu poderia ter trilhado um caminho relativamente mais simples, mas escolhi mergulhar nesse universo de pesquisa novo e desafiador, e apesar das dificuldades, foi gratificante vivenciar cada etapa desse estudo, por isso agradeço a Deus por ter me dado coragem, perseverança e força durante esses dois anos, e a todas as pessoas que me ajudaram durante essa trajetória, de forma direta ou indiretamente, possibilitando a conclusão deste trabalho.

Ao Professor Alexandre Clistenes pela oportunidade de realizar esse estudo, para mim, foi uma satisfação enorme, um período de muito aprendizado, grata por contar com sua orientação e por contribuir para o meu amadurecimento na pesquisa científica.

À Professora Taise Bomfim, ela que me acolheu desde a graduação, por isso, tenho várias razões para ser grata! Obrigada pela orientação e por todas as condições oferecidas para a execução deste estudo. E em especial, gratidão por ter me incentivado a continuar minha trajetória acadêmica, por sempre acreditar no meu potencial e pelo apoio na conciliação das identidades de mãe e cientista.

Ao Projeto “Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) em Ambientes Marinhos Tropicais – AmbTropic – fase II” pela obtenção dos peixes analisados nesse estudo, especialmente à Natália Souza que disponibilizou os exemplares para as análises e pela ajuda na mensuração dos dados biométricos.

À equipe do Laboratório de Ictiologia e Pesca (LIPE) - UEFS que me acolheu como parte do grupo, sempre disposta a sanar dúvidas, contribuir com o trabalho e pelas oportunidades de participar das coletas de campo, experiências incríveis! Agradeço, de modo especial, à Jaciela Lange, pela disponibilidade, paciência e auxílio na identificação dos estágios de maturação das gônadas. Obrigada Jacy, você é um ser de luz!

Aos Professores: George Olavo por disponibilizar os dados dos desembarques pesqueiros, Luiza Sarmiento e André Teixeira pelos materiais disponibilizados e conversas enriquecedoras que contribuíram para refletir e interpretar os dados, e Carolina Santana, pelo treinamento na dissecação dos peixes, separação dos tecidos e pelas dúvidas esclarecidas nas etapas de tratamento das amostras.

Ao Prof. Antônio Costa pelas aulas de bioestatísticas e por nortear os meus primeiros passos na análise estatística, e ao Prof. Elmo pela disponibilidade e ajuda na análise multivariada.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Evolução pela oportunidade de realizar o curso, que amplificou ainda mais o meu interesse pela área. Aos professores, que

contribuíram para a minha formação, e aos colegas, pela jornada compartilhada e apoio, especialmente Ingrid, Gabriela e Bárbara pela ajuda na modelagem dos dados.

Ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente pelo suporte para a realização dessa pesquisa.

À equipe do Laboratório de Geoquímica e Catálise Ambiental (LGCA) - UEFS, especialmente a Rose, minha amiga química, pelo auxílio em todas as etapas laboratoriais, a Alexandre e Cleiton pela ajuda na leitura dos metais e a Kevin pelas contribuições na análise multivariada.

À Professora Sarah Rocha do Laboratório de Estudos de Petróleo (LEPETRO) - UFBA pela ajuda na determinação dos metais, pelos conhecimentos compartilhados e, sobretudo, pela simpatia e positividade que emana mesmo quando tínhamos problemas na leitura das amostras, amei te conhecer, Sarinha!

A minha amiga geógrafa, Luciana Luz, pelas orientações na elaboração do mapa de localização.

A minha dupla da UEFS para vida, Taís, obrigada pela irmandade e pelo consolo nos momentos de angústia da pesquisa.

À Creche-UEFS e ao Espaço Pedagógico e Recreativo Arca de Noé por serem minha rede de apoio.

Ao meu amado filho, Arthur Levi, obrigada por comemorar, vibrar e pular comigo cada gráfico, cada análise e cada etapa concluída, mesmo sem entender o que significava, ele sabia que era uma conquista e ficava muito feliz por isso. Obrigada pelo carinho e cuidado, você me reenergizou e me inspirou a dar sempre o meu melhor.

Ao meu companheiro de vida, Danilo José, grata pela paciência, apoio e encorajamento! Você é meu ponto de paz, amor!

A toda minha família pelas orações e por todo amor, e aguardar ansiosamente a chegada desse dia. Em breve estarei de volta.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Esse estudo contou também com financiamento da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia –FAPESB.

RESUMO GERAL

A entrada de poluentes em ecossistemas aquáticos influencia na estrutura populacional de peixes e favorece a bioacumulação de elementos químicos nos organismos. Em 2019, houve o maior derramamento de óleo no litoral do Brasil, e nesse contexto, o objetivo desse estudo foi avaliar a estrutura populacional e a bioacumulação de metais em peixes, *Lutjanus synagris* e *Haemulon aurolineatum*, de Itacaré (área menos afetada), Tinharé-Boipeba (área mais afetada) e Madre de Deus (área afetada cronicamente). Foi mensurado o comprimento total, peso e fator de condição, e identificados o sexo, estágios de maturação e fase ontogenética dos peixes. A quantificação de metais no músculo e fígado foi realizada através do ICP-OES (Plasma por Acoplamento Indutivo). Os menores valores biométricos foram registrados em áreas mais críticas em relação à presença de óleo, seja a área cronicamente afetada para *H. aurolineatum*, ou na área mais afetada pelo acidente no litoral para *L. synagris*. Em ambas as espécies, a condição corporal dos peixes foi maior em Itacaré (menos afetada pelo óleo). Os resultados indicam que o distúrbio do óleo pode estar influenciando nas mudanças dos aspectos populacionais das espécies. A contaminação por metais pode ter contribuído para essas diferenças. Alguns elementos químicos influenciaram negativamente o crescimento (As, Ba e Cr), fator de condição (As, Ba e Zn) e índice hepatossomático (IHS) (As, Ba, Cr, Zn e Fe), indicando que a contaminação metálica pode ter reduzido os índices fisiológicos. O fígado foi o principal órgão bioacumulador dos elementos químicos. A maioria dos metais que diferiu apresentou maiores níveis nos peixes juvenis e imaturos. No tecido muscular, a concentração de As no ariacó foi superior em Itacaré e, na quatinga foi maior em Tinharé-Boipeba. No tecido hepático, os níveis elementares foram maiores nos peixes em Madre de Deus, nas duas espécies. Apenas nessa população houve contaminação por Pb, enquanto as concentrações de As nas três áreas foram próximas ou acima do valor máximo aceitável pela Anvisa. Sugere-se que o derramamento de óleo pode ter impactado diferentemente as espécies, trazendo impactos também aos peixes de áreas menos afetadas. Contudo, as concentrações de metais nos peixes em Madre de Deus se destacaram, ao comparar com as populações das outras áreas estudadas. Esse estudo mostra a influência dos aspectos biológicos e ambientais na bioacumulação de metais nos peixes.

Palavras-chave: contaminação, *Haemulon aurolineatum*, *Lutjanus synagris*, petróleo.

ABSTRACT

The entry of pollutants into aquatic ecosystems influences the population structure of fish and favors the bioaccumulation of chemical elements in organisms. In 2019, there was the largest oil spill off the coast of Brazil, and in this context, the aim of this study was to evaluate the population structure and bioaccumulation of metals in fish, *Lutjanus synagris* and *Haemulon aurolineatum*, from Itacaré (least affected area), Tinharé-Boipeba (most affected area) and Madre de Deus (chronically affected area). Total length, weight and condition factor were measured, and the sex, maturation stages and ontogenetic phase of the fish were identified. Metals were quantified in the muscle and liver using ICP-OES (Inductively Coupled Plasma). The lowest biometric values were recorded in the most critical areas in relation to the presence of oil, either the chronically affected area for *H. aurolineatum* or the area most affected by the accident on the coast for *L. synagris*. In both species, the body condition of the fish was higher in Itacaré (less affected by the oil). The results indicate that the oil disturbance may be influencing changes in the population aspects of the species. Metal contamination may have contributed to these differences. Some chemical elements negatively influenced growth (As, Ba and Cr), condition factor (As, Ba and Zn) and hepatosomatic index (HSI) (As, Ba, Cr, Zn and Fe), indicate that metal contamination may have reduced physiological indices. The liver was the main organ that bioaccumulated chemical elements. Most of the metals that differed showed higher levels in juvenile and immature fish. In muscle tissue, the concentration of As in Ariacó was higher in Itacaré and in Quatinga it was higher in Tinharé-Boipeba. In liver tissue, elemental levels were higher in fish from Madre de Deus, in both species. Only this population was contaminated by Pb, while the concentrations of As in the three areas were above or close to the maximum value acceptable to Anvisa. It is suggested that the oil spill may have impacted the species differently, also impacting fish from less affected areas. However, the concentrations of metals in the fish in Madre de Deus stood out when compared to the populations in the other areas studied. This study shows the influence of biological and environmental aspects on the bioaccumulation of metals in fish.

Keywords: contamination, *Haemulon aurolineatum*, *Lutjanus synagris*, petroleum.

SUMÁRIO

REFERENCIAL TEÓRICO	9
INTERAÇÃO METAIS, SERES VIVOS E ECOSISTEMAS	9
DERRAMAMENTO DE PETRÓLEO.....	9
PEIXES	12
BIBLIOGRAFIA DO REFERENCIAL TEÓRICO	16
INFORMAÇÃO SOBRE A DISSERTAÇÃO	23
CAPÍTULO 1: Estrutura populacional de peixes das famílias Lutjanidae e Haemulidae (Actinopterygii - Eupercaria/misc), em áreas afetadas pelo óleo na Bahia, Brasil	24
Resumo	24
Introdução.....	24
Materiais e métodos.....	26
Resultados.....	29
Discussão	36
Conclusão	42
Agradecimentos	43
Referências	43
CAPÍTULO 2: Bioacumulação de elementos químicos em peixes de áreas afetadas por óleo no litoral da Bahia, Brasil	48
Resumo	48
Introdução.....	48
Materiais e métodos.....	50
Resultados e discussão.....	52
Considerações finais	68
Agradecimentos	69
Referências	69
CONCLUSÕES GERAIS	75

REFERENCIAL TEÓRICO

INTERAÇÃO METAIS, SERES VIVOS E ECOSISTEMAS

Os ecossistemas correspondem a um sistema transformador de energia, nos quais, os nutrientes são regenerados e retirados amplamente dentro do sistema (Ricklefs 2010), sendo a vida constituída por compostos orgânicos e inorgânicos. Os metais são compostos inorgânicos fundamentais para os seres vivos, pois são componentes da maioria dos processos biológicos (Wolfe-Simon et al. 2011). Por exemplo, atuam como co-fatores de proteínas que potencializam a capacidade catalítica, permitem a transferência de elétrons e atuam na sua estabilidade (Cvetkovic et al. 2010). O Cu constitui a citocromo oxidase no ciclo energético (Albarède 2009), o Fe atua no transporte de oxigênio no sangue, o Mn está envolvido na utilização da glicose (Förstner, 1983), enquanto o Zn é um dos metais prevalentes da vida, estando presente em mais de 3.000 proteínas (Maret 2016).

Há um paradoxo em relação à concentração de alguns metais, pois muitos são essenciais em pequenas quantidades e tóxicos em níveis elevados, enquanto outros metais são tóxicos mesmo em baixa concentração (Wolfe-Simon et al. 2011). Portanto, são categorizados em dois grupos: elementos essenciais, aqueles metais que desempenham função no metabolismo dos organismos, e os elementos não-essenciais, cujos metais não tem função biológica e desencadeiam efeitos tóxicos mesmo em baixas concentrações (Loureiro & Hepp 2020). Considerando que os metais possam apresentar toxicidade, esses elementos são classificados como PTE (Elementos Potencialmente Tóxicos) (Pourret & Hursthouse 2019).

Os metais ocorrem naturalmente no ambiente, e, suas fontes podem ser naturais como: deposição atmosférica e intemperismo, e de origem antropogênica, como: mineração, drenagem agrícola, descarga de esgotos e efluentes industriais, derramamento de derivados de petróleo e resíduos químicos (Sheikhzadeh & Hamidian 2021). Os seres vivos obtêm os metais a partir da captação direta da matriz ambiental e/ou do consumo de alimento (Chojnacka & Mikulewicz 2014).

DERRAMAMENTO DE PETRÓLEO

Os derramamentos de petróleo são fontes de entrada de vários contaminantes no ambiente marinho. O petróleo é uma mistura complexa que contém substâncias tóxicas, como compostos orgânicos voláteis (COV), hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA), sulfeto de hidrogênio e metais, que apresentam riscos toxicológicos graves, agudos e crônicos (Pena et al. 2020). Portanto, a presença de petróleo no ambiente desencadeia o enriquecimento de hidrocarbonetos e também de metais nos ecossistemas (Oyetibo et al. 2021).

Os ambientes marinhos vêm sendo impactados pelos derramamentos de óleo que ocorrem em várias partes do mundo: no Golfo do México (2010), no Alasca, EUA (1989), Reino Unido (1993 e 1996), Paquistão (2003), Coreia do Sul (2007), e os constantes derrames por mais de 20 anos na Nigéria (Pena et al. 2020). No Brasil, os acidentes ocorridos no litoral vêm crescendo, desde 1950 as áreas costeiras são impactadas pelo petróleo, sobretudo nos estados da Bahia e Rio de Janeiro (Ferreira et al. 2022). Em 1992, houve derramamento de 48.000 litros de petróleo na Baía de Todos os Santos (BTS), e em abril de 2009 ocorreu o vazamento de aproximadamente 2.500 litros de óleo na região (Hatje & Andrade 2009).

Em 2019, houve um derramamento de óleo ao longo da costa brasileira, atingindo 11 estados, mais de 55 áreas costeiras e marinhas protegidas e mais de 4.000 km do litoral. Foi considerado o mais extenso das regiões costeiras tropicais e o pior derrame da história do Brasil, devido à quantidade e extensão de áreas atingidas (De Andrade & Coutinho 2022). Em 2020 e 2021, o óleo reapareceu de forma intermitente, seguindo períodos de altas ondas e ventos fortes, e até hoje ainda é detectada a presença de óleo na plataforma continental, manguezais e recifes (Reddy et al. 2022). O petróleo continua aderido em estruturas rígidas como rochas e recifes, e as manchas de óleo são encontradas ainda em algumas regiões, e, portanto, os impactos a médio e longo prazo podem ser maiores, e ainda não foram avaliados (Gusmão et al. 2021).

Análises geoquímicas do óleo sugerem que seja óleo cru ou óleo combustível pesado. As amostras de óleo do nordeste do Brasil compartilham a mesma fonte do sul, evidenciando uma fonte compartilhada em toda a costa brasileira, e sua composição está muito correlacionada com o petróleo venezuelano. As hipóteses mais recentes sobre a origem do óleo são: (1) o óleo derramado (intencionalmente ou não) de navios em trânsito na costa do Brasil e (2) o óleo veio de naufrágios (recentes ou antigos). Contudo, a fonte exata do óleo ainda não foi determinada de forma conclusiva (Reddy et al. 2022, Soares et al. 2022).

Foram retiradas das paisagens mais de 5.000 toneladas de resíduos de petróleo, dos quais afetaram mais de 980 praias, com impactos imediatos na biodiversidade, turismo e segurança alimentar (Melo et al. 2022). Em função desse derramamento, houve queda no turismo e comércio de peixes, afetando as comunidades costeiras, saúde, bem-estar e economia, cujos impactos socioambientais podem se estender por gerações (Azevedo et al. 2022). Os relatórios oficiais indicaram 159 ocorrências da fauna oleada, sendo registradas 112 mortes, incluindo aves, tartarugas e mamíferos marinhos. Salienta-se que a Bahia foi o estado com maior registro de animais atingidos (n=67), dos quais houve 42 mortes (Ibama, 2020).

Manchas de óleo foram observadas em algas, esponjas, cnidários, moluscos, poliquetas, crustáceos, equinodermos, peixes, tartarugas e pássaros. Foi relatada contaminação por hidrocarbonetos aromáticos policíclicos em peixes e moluscos, redução na riqueza e abundância de poliquetas, mudanças na proporção sexual de caranguejos, prevalência de espécies oportunistas em comunidades, e redução no tamanho e anormalidades em larvas de peixes (Soares & Rabelo, 2023).

Portanto, esse derrame de óleo no litoral do Brasil pode ser considerado um distúrbio ecológico, pois implicam em mudanças forçadas externamente para um sistema que se afasta das condições que predominavam anteriormente. Os distúrbios são definidos como qualquer evento relativo discreto no tempo (e espaço) que perturba/altera estruturas de ecossistemas, comunidades ou populações e muda recursos, disponibilidade de substrato ou ambiente físico (Pickett & White 1985). Dessa forma, as perturbações ambientais desempenham um papel importante na estrutura e funcionamento dos sistemas ecológicos, em múltiplas escalas espaciais e temporais. Portanto, os distúrbios antropogênicos podem desencadear mudanças na composição biótica e nas condições abióticas (Beever et al. 2019).

Após o derrame de óleo foram realizados vários estudos sobre impactos ambientais, sociais e econômicos, e análises químicas em organismos aquáticos e matrizes ambientais, com destaque na quantificação de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos para avaliação dos riscos à saúde humana (Disner & Torres 2020, Azevedo et al. 2022, Magalhães et al. 2022, Reddy et al. 2022, Soares et al. 2022). Foi encontrado apenas um estudo na Bahia sobre os impactos do óleo em assembleia de ictioplâncton, onde foram observadas altas taxas de anormalidades no desenvolvimento embrionário em ovos de peixes, e deformidades na coluna vertebral e edema do saco vitelino nas larvas (Souza et al. 2022). Entretanto, após o derrame não há estudos sobre a dinâmica populacional de peixes, considerando os aspectos biométricos, reprodutivos e relacionando essas características com a bioacumulação de metais.

Considerando as áreas deste estudo (Itacaré, Tinharé-Boipeba e Madre de Deus), vale destacar que antes do derrame do óleo há registros de contaminação por metais em peixes apenas na Baía de Todos os Santos (BTS), e, portanto, considera-se Madre de Deus, uma área historicamente contaminada devido à exploração petrolífera na região. Há registro de contaminação por metais na BTS desde 1975, principalmente por Cu, Pb, Zn, Mn e Cd na água, sedimento, material particulado em suspensão e em várias espécies de peixes, bivalves, crustáceos e flora de manguezal. Nessa região foi estudada a bioacumulação de metais em peixes, avaliando as concentrações de Al, As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, V e Zn em

músculos de espécies carnívoras e planctívoras (Santana et al. 2017). Nos peixes, a contaminação foi principalmente por As e Hg. Nas espécies de tainha, arraia, coró, sardinha e linguado destacaram elevados teores de Hg (Hatje et al. 2009). Foi constatada também contaminação por Cr, As e Se em *Lutjanus synagris* (ariacó), *Caranx latus* (guarajuba), *Archosargus rhomboidalis* (sambuio), *Scomberomorus cavalla* (cavala) e *Sphyræna guachancho* (bicuda) (Silva et al. 2016) e por As e Cd em 19 espécies de peixes da região (Santana et al. 2017).

PEIXES

Lutjanus synagris

A espécie *Lutjanus synagris*, conhecida por ariacó, pertence à família Lutjanidae, uma espécie marinha que habita águas entre 20 e 400 m de profundidade, com peixes maiores ocorrendo em áreas mais profundas. Sua área de distribuição compreende o Atlântico Ocidental tropical e subtropical, de Bermudas e Carolina do Norte ao sudeste do Brasil, incluindo Golfo do México e Mar do Caribe. São peixes que possuem um crescimento lento e atinge a maturidade relativamente tarde (Cervigó 1993, Fernandes et al. 2022).

Alimentam-se em áreas de ervas marinhas, predadora generalista noturna, mas que apresentam diferenças nas interações tróficas conforme a fase ontogenética (Juárez-Camargo et al. 2020). Os peixes da família Lutjanidae realizam migrações ontogenéticas, habitando manguezais, estuários, ervas marinhas, fundos duros e na plataforma interna quando juvenis, mudando para habitats externos, mais profundos e associados a recifes, quando adultos (McMahon et al. 2012; Aschenbrenner et al. 2016; Dance & Rooker, 2019). A época reprodutiva de *L. synagris* ocorre durante todo o ano, com prolongada reprodução, pois a sua desova é do tipo parcelada. Na região do nordeste essa espécie apresenta picos nos meses de abril, maio e junho (Lira, 2019).

A espécie supracitada foi categorizada ao nível global e nacional como Quase Ameaçada (NT), e sua tendência populacional atual é decrescente (ICMBio, 2018). A sobrepesca é a principal ameaça, pois *L. synagris* é considerada um importante recurso pesqueiro em toda a área de ocorrência, devido a excelente qualidade de sua carne, gerando alta demanda e valor econômico (Lindeman, 2016).

Haemulon aurolineatum

A espécie *Haemulon aurolineatum*, conhecida como quatinga ou xira-branca, pertence à família Haemulidae, uma das mais abundantes famílias de peixes da costa brasileira (Rangel

et al. 2007; Souza et al. 2007). A área de distribuição corresponde o Atlântico ocidental, Massachusetts, Estados Unidos, Bermudas, Golfo do México até Brasil (Smith, 1997). Ocorre principalmente em recifes e regulam a abundância de invertebrados (Melo et al. 2020), alimentando-se de pequenos crustáceos, moluscos e outros invertebrados bentônicos, além de algas e plâncton (Gold-Bouchot et al., 2017). A desova dos haemulídeos acontece no mar, especialmente ao anoitecer para evitar a predação. A reprodução ocorre durante todo o ano, não havendo uma época definida. Estudos na região do nordeste relatam indivíduos maduros durante todos os meses (Lessa et al. 2004).

Apresenta comportamento de forrageio noturno, constituindo a comunidade de recifes e servindo como presas para espécies maiores, como pargos e garoupas. Esta espécie é caracterizada pela formação de agregações denominadas schoolings ou cardumes polarizados - grupos de indivíduos da mesma classe de tamanho que nadam em sincronia próximos a substratos duros durante o dia. Esses grupos podem ser heterogêneos pela presença conjunta de outras espécies com tamanho similar (Darcy, 1983). Segundo a avaliação da Lista Vermelha de Espécies Ameaçadas, *H. aurolineatum* está categorizada como Menos Preocupante (LC), embora esteja sujeita a pressão de pesca, possui valor comercial relativamente pequeno e há pouca evidência de declínios populacionais (Anderson et al. 2015).

Aspectos populacionais

O comprimento de peixes de uma mesma espécie localizados em diferentes áreas pode ser atribuído às diferenças populacionais. Maior tamanho está associado a melhores condições ambientais, indicando maior disponibilidade de alimento e locais de abrigo. As taxas de crescimento apresentam variações conforme o tipo de habitat, levando a diferenças na distribuição do comprimento (Gomiero & Braga, 2005). Devido às condições estressantes em ambientes perturbados, os peixes apresentam maior estresse oxidativo do que em ambientes mais estáveis. Por exemplo, peixes em condição de seca intermitente (ambiente perturbado) apresentam menor tamanho do que aqueles em ambientes estáveis (Ondei et al. 2020).

O petróleo é uma fonte de estresse para os seres vivos, principalmente aos peixes, podendo provocar redução na alimentação e no crescimento, e morte dos organismos (Ibemenuga, 2013). Devido à ingestão de hidrocarbonetos derivados do petróleo causados pelo derrame no mar do Alasca, populações de peixes apresentaram deformidades e redução no crescimento (Short 2017). Alguns metais podem provocar também essas mudanças morfológicas nos peixes (Qadir & Malik 2011).

Os ambientes perturbados podem afetar também a maturação e reprodução dos peixes, pois, são processos regulados por substâncias endógenas (hormônios) e sincronizados por fatores exógenos (fotoperíodo e temperatura). Portanto, esses processos podem ser afetados com a introdução de substâncias químicas pela atividade humana. Contaminantes orgânicos e inorgânicos podem provocar a maturação sexual precoce e inibir o desenvolvimento gonadal em peixes (Arukwe & Goksoyr 2012). Altas concentrações de metais em peixes trazem efeitos deletérios na reprodução, comportamento, crescimento e sobrevivência (Salgado- Ramírez et al. 2017), a exemplo do Cd que é um metal tóxico e diminui a capacidade reprodutiva dos peixes (Franco-Fuentes et al. 2021).

Condição corporal dos peixes

A condição corporal dos indivíduos é definida pelas reservas energéticas, como carboidratos, proteínas e lipídeos. Compreende um fator crucial para determinar a aptidão. Portanto, torna-se importante compreender a dinâmica populacional em termos energéticos, pois a condição corporal contribui para o sucesso reprodutivo dos organismos. Considera-se que os peixes com melhor condição corporal apresentem maior taxa de crescimento e maior potencial reprodutivo e de sobrevivência. O fator de condição é um indicador do grau de higidez de um indivíduo, seu valor reflete condições nutricionais recentes e/ou gasto de reservas em atividades cíclicas, possibilitando relações com condições ambientais e aspectos comportamentos das espécies (Vazzoler, 1996). É calculado a partir da relação peso e comprimento do indivíduo, que fornece estimativa indireta da energia estocada pelos animais (Camara et al. 2011). É um indicador da saúde e do estado fisiológico de populações de peixes (Karadurmuş 2022), que pode ser afetado pela condição e estresse ambiental, disponibilidade de alimento e tipo de habitat. Esses estudos são importantes para o conhecimento da biologia populacional de espécies de peixes (Çiçek et al. 2022).

Bioacumulação

Quando a entrada de elementos químicos excede a eliminação ocorre a bioacumulação, processo caracterizado pela quantidade total de uma substância acumulada no corpo do organismo. Os seres vivos bioacumulam várias substâncias (orgânicas e inorgânicas) no decorrer do seu ciclo de vida. A questão-problema da bioacumulação é a ocorrência dos efeitos tóxicos, e, portanto, depende do elemento químico, da espécie e do seu ambiente de vida. Esse processo é influenciado por fatores ambientais, como a concentração, biodisponibilidade e persistência dos metais no habitat, e pelo metabolismo do próprio

organismo, ou seja, dos mecanismos internos regulatórios e as funções dos diferentes tecidos (Pan et al. 2022). Os níveis de contaminantes se diferem conforme a idade, fase de desenvolvimento e outros fatores fisiológicos (Eyankware & Obasi 2021). A bioacumulação de metais significa que eles estão disponíveis para os seus respectivos predadores (incluindo a espécie humana), e, essa transferência na cadeia alimentar é chamada de biomagnificação (Burger & Gochfeld 2011).

Saúde humana

Considerando a biomagnificação dos metais, a espécie humana pode ser afetada por meio do consumo de peixes contaminados. Dessa forma, a ingestão de peixes com concentração de metais superiores aos níveis seguros pode desencadear em altos riscos à saúde humana (Sheikhzadeh & Hamidian 2021). O As, Pb, Hg e Cd são considerados metais tóxicos, quando presentes no tecido muscular de peixes em níveis em partes por milhão (ppm), podem causar efeitos deletérios na saúde humana (Silva et al. 2020a), como danos no fígado e no rim, hipertensão e deformação nos ossos, problemas nos sistemas hematopoiético, nervoso e cardiovascular (Eyankware & Obasi 2021). A ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária) de 19 de agosto de 2013 estabelece limites máximos de contaminantes inorgânicos em alimentos. Os valores do limite máximo de metais em peixes são: 1,0 mg.kg⁻¹ de As, 0,30 mg.kg⁻¹ de Pb, 0,05 mg.kg⁻¹ de Cd, 1,0 mg.kg⁻¹ de Hg para peixes predadores e 0,50 mg.kg⁻¹ de Hg para peixes não-predadores (Anvisa 2013).

Este estudo apresenta a primeira avaliação da estrutura populacional de peixes e de bioacumulação de metais após o derramamento de óleo na costa brasileira, o qual pode colaborar para a compreensão da biodisponibilidade de elementos químicos no ambiente e dos impactos desse distúrbio em espécies de peixes abundantes e de importância comercial. Considerando a magnitude desse acidente e o pouco conhecimento sobre os seus efeitos nos ecossistemas costeiros, acreditamos que as informações deste estudo serão fundamentais para o entendimento dos processos em curso e a mitigação dos possíveis impactos na ictiofauna.

Os derramamentos de petróleo são fontes de entrada de vários contaminantes no ambiente, incluindo os metais, os quais favorecem a bioacumulação nos organismos. Sendo assim, nossa hipótese é que as áreas com diferente intensidade de contaminação por óleo desencadeiam padrões distintos de bioacumulação de metais e variação nos aspectos populacionais dos peixes. O objetivo geral desse estudo foi avaliar a estrutura populacional e a bioacumulação de elementos químicos em peixes, *Lutjanus synagris* e *Haemulon aurolineatum*, pertencentes às famílias Lutjanidae e Haemulidae, respectivamente, de

diferentes ambientes afetados pelo óleo no litoral da Bahia: Itacaré (área menos afetada), Tinharé-Boipeba (área mais afetada) e Madre de Deus (área afetada cronicamente).

BIBLIOGRAFIA DO REFERENCIAL TEÓRICO

- Ainsworth CH, Paris CB, Perlin N, Dornberger LN, Patterson WF, Chancellor E, Murawski S, Hollander D, Daly K, Romero IC, Coleman F, Perryman H (2018) Impacts of the Deepwater Horizon oil spill evaluated using an end-to-end ecosystem model. *PLoS One* 13:1–21.
- Albarède F (2009) *Geochemistry: an introduction*, 2^a. New York.
- Allen GR (1985) Um catálogo anotado e ilustrado das espécies de lutjanídeos conhecidas até o momento. *Peixe FAO* 125:208.
- Anvisa (2013) Resolução - RDC n° 42 de 29 de agosto de 2013.
- Aschenbrenner A, Hackradt CW, Ferreira BP (2016) Spatial variation in density and size structure indicate habitat selection throughout life stages of two Southwestern Atlantic snappers *Mar. Environ. Res.*, 113: 49-55.
- Azevedo AK, Vieira FAS, Guedes-Santos J, Gaia JA, Pinheiro BR, Bragagnolo C, Correia RA, Ladle RJ, Malhado ACM (2022) A big data approach to identify the loss of coastal cultural ecosystem services caused by the 2019 Brazilian oil spill disaster. *An Acad Bras Cienc* 94:1–11.
- Battisti C, Poeta G, Faneli G (2016) *An introduction to disturbance ecology: a road map for wildlife management and conservation*. Springer International Publishing, Cham, Switzerland.
- Beever EA, Prange S, DellaSala DA (2019). *Disturbance ecology and biological diversity: scale, context and nature*. Imprensa CRC (Ed) Boca Raton.
- Begon M., Townsend CR., Harper JL (2007) *Ecologia de indivíduos a ecossistemas*, 4^a. Artmed (ed) São Paulo.
- Boaventura SF, Hadlich GM, Celino JJ (2011) Índices de contaminação de metais traço em encostas, manguezais e apicuns, Madre de Deus, Bahia
- Bravo E, Eslava N, González L (2009) Crecimiento y mortalidad natural del pez *Haemulon aurolineatum* (Teleostei: Haemulidae) del suroeste de la isla de Margarita, Venezuela. *Rev Biol Trop* 57:699–706.
- Brown-Peterson NJ, Wyanski DM, Saborido-Rey F, Macewicz BJ, Lowerre-Barbieri SK (2011) A standardized terminology for describing reproductive development in fishes. *Mar Coast Fish* 3:52–70.

- Burger J, Gochfeld M (2011) Mercury and selenium levels in 19 species of saltwater fish from New Jersey as a function of species, size, and season. *Sci Total Environ* 409:1418–1429.
- Camara EM, Caramaschi ÉP, Petry AC (2011) Fator de condição: Bases conceituais, aplicações e perspectivas de uso em pesquisas ecológicas com peixes. *Oecologia Aust* 15:249–274.
- Caramaschi ÉP, Brito MFG (2021) Reprodução de peixes de riacho: estado da arte, métodos e perspectivas. *Oecologia Aust* 25:323–343.
- Cavalcante LFM, Oliveira MR, Chellappa S (2012) Aspectos Reprodutivos do Ariacó, *Lutjanus synagris* nas Águas Costeiras do Rio Grande do Norte. *Biota Amaz* 2:45–50.
- Cervigó F (1993) Los peces marinos de Venezuela. Fundación científica los roques (ed) Caracas, Venezuela.
- Chojnacka K, Mikulewicz M (2014) Bioaccumulation. *Encycl Toxicol Third Ed* 1:456–460.
- Çiçek E, Seçer B, Sungur S, Öztürk S, Bahçeci H (2022) Length-weight relationships and condition factors of 28 fish species belonging to Leuciscidae (Cypriniformes) from Turkey. *J Appl Ichthyol* 38:364–367.
- Cvetkovic A, Menon AL, Thorgersen MP, Scott JW, Poole FL, Jenney FE, Lancaster WA, Praissman JL, Shanmukh S, Vaccaro BJ, Trauger SA, Kalisiak E, Apon J V., Siuzdak G, Yannone SM, Tainer JA, Adams MWW (2010) Microbial metalloproteomes are largely uncharacterized. *Nature* 466:779–782.
- Dance MA, Rooker JR (2019) Cross-shelf habitat shifts by red snapper (*Lutjanus campechanus*) in the Gulf of Mexico *PLoS One*, 14:3.
- Darcy, G. (1983). Synopsis of biological data on the grunts *Haemulon aurolineatum* and *Haemulon plumieri* (Pisces: Haemulidae). NOAA technical report NMFS circular (USA). 448: 1-37.
- De Andrade JB, Coutinho R (2022). Oil spill on the brasilian coast. *An Acad. Bras. Ciênc*, 94: 1-4.
- Disner GR, Torres M (2020) The environmental impacts of 2019 oil spill on the Brazilian coast: Overview. *Rev Bras Gestão Ambient e Sustentabilidade* 7:241–255.
- Euzebio CS, Rangel GDS, Marques RC (2019) Derramamento de Petróleo e seus impactos no ambiente e na saúde humana. *Rev Bras Ciências Ambient* 1:79–98.

- Eyankware MO, Obasi PN (2021) A holistic review of heavy metals in water and soil in Ebonyi SE, Nigeria; with emphasis on its effects on human, plants and aquatic organisms. *World News Nat Sci* 38:1–19.
- Famoofo OO, Abdul WO (2020) Biometry, condition factors and length-weight relationships of sixteen fish species in Iwopin fresh-water ecotype of Lekki Lagoon, Ogun State, Southwest Nigeria. *Heliyon* 6:1–8.
- Fernandes JFF, Freitas J, de Araújo SA, de Santana TC, Lobato RS, Figueiredo MB (2022) Reproductive biology of the lane snapper, *Lutjanus synagris* (Linnaeus 1758) (Perciformes, Lutjanidae), in the Maranhão continental shelf, Northeast of Brazil. *Environ Biol Fishes* 105:1033–1050.
- Fernandes JFF, Freitas J, Nunes YBS, Lobato RS, Figueiredo MB (2021) Feeding habits of *Lutjanus synagris* (Teleostei: Lutjanidae) in the Amazon Coast of the Northeast Region of Brazil. *Bol do Inst Pesca* 46:1–12.
- Ferreira BMP, Do Bonfim C V., Raposo IPA, Quinamo TS, De Campos LHR (2022) Socio-environmental disasters and their impacts: socioeconomic consequences of the oil spill in the northeast region of Brazil. *An Acad Bras Cienc* 94:1–22.
- Franco-Fuentes E, Moity N, Ramírez-González J, Andrade-Vera S, González-Weller D, Hardisson A, Paz S, Rubio C, Gutiérrez Á (2021) Metal and metalloids concentration in Galápagos fish liver and gonad tissues. *Mar Pollut Bull* 173:1–10.
- Gomiero LM, Villares Junior GA, Braga FM de S (2010) Relação peso-comprimento e fator de condição de *Oligosarcus hepsetus* (Cuvier, 1829) no Parque Estadual da Serra do Mar - Núcleo Santa Virgínia, Mata Atlântica, estado de São Paulo, Brasil. *Biota Neotrop* 10:101–105.
- Hasan MR, Mamun A Al, Hossain MY (2021) Biometric indices of eleven mangrove fish species from southwest Bangladesh. *Egypt J Aquat Res* 47:207–213.
- Hatje V, Andrade JB (2009) Baía de Todos os Santos: aspectos oceanográficos. EDUFBA (ed) Salvador.
- Hatje V, Bícigo MC, Carvalho GC, Andrade JB (2009) Contaminação química. In: *Baía de todos os santos: aspectos oceanográficos*. p 244–297
- Ibemenuga KN (2013a) Impactos of crude oil on freshwater fish fauna, its control and management measures. *Anim Res Int* 10:1799–1804.
- Imorou RS, Adite A, Sossoukpe E, Abou Y (2019) Length-weight models and condition factors of fishes from Okpara Stream, Oueme River, Northern-Benin. *Int J For Anim Fish Res* 3:65–80.

- Jesus RS (2011) Metais traço em sedimentos e no molusco bivalve *Anomalocardia brasiliensis* (Gmelin, 1791), municípios de Madre de Deus e de Saubará, Bahia. Universidade Federal da Bahia
- Jiang X, Wang J, Pan B, Li D, Wang Y, Liu X (2022) Assessment of heavy metal accumulation in freshwater fish of Dongting Lake, China: Effects of feeding habits, habitat preferences and body size. *J Environ Sci* 112:355–365.
- Juárez-Camargo PG, Sosa-López A, Torres-Rojas YE, Mendoza-Franco EF, García SA (2020) Feeding habits variability of *Lutjanus synagris* and *Lutjanus griseus* in the littoral of campeche, Mexico: An approach of food web trophic interactions between two snapper species. *Lat Am J Aquat Res* 48:552–569.
- Karadurmuş U (2022) Length–Weight Relationship and Condition Factor of Sixteen Demersal Fish Species from the Southern part of the Marmara Sea, Turkey. *J Ichthyol* 62:543–551.
- Lessa RP, Nóbrega MF, Bezerra Junior JL (2004) Dinâmica de populações e avaliação dos estoques dos recursos pesqueiros da região nordeste. Recife.
- Lira RD (2019) Dinâmica populacional do peixe ariocó, *Lutjanus synagris* (Linnaeus, 1758) (Actinopterygii: Perciformes) nas águas costeiras do Rio Grande do Norte, Brasil
- Loureiro RC, Hepp LU (2020) Stream contamination by trace elements: Biota incorporation and phytoremediation. *Acta Limnol Bras* 32:1–9.
- Magalhães KM, Carreira RS, Rosa Filho JS, Rocha PP, Santana FM, Yogui GT (2022) Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in fishery resources affected by the 2019 oil spill in Brazil: Short-term environmental health and seafood safety. *Mar Pollut Bull* 175:1–9.
- McMahon KW, Berumen ML, Thorrold SR (2012) Linking habitat mosaics and connectivity in a coral reef seascape *Proc. Natl. Acad. Sci. Unit. States Am.*, 109: 15372-15376.
- Maret W (2016) The metals in the biological periodic system of the elements: Concepts and conjectures. *Int J Mol Sci* 17:1–8.
- Melo CC, Soares APC, Pelage L, Eduardo LN, Frédou T, Lira AS, Ferreira BP, Bertrand A, Lucena-Frédou F (2020) Haemulidae distribution patterns along the Northeastern Brazilian continental shelf and size at first maturity of the most abundant species. *Reg Stud Mar Sci* 35:1–11.

- Nascimento WS, Yamamoto ME, Chellappa S (2012) Proporção Sexual e Relação Peso-Comprimento do Peixe Anual *Hypsolebias antenori* (Cyprinodontiformes: Rivulidae) de Poças Temporárias da Região Semiárida do Brasil. *Biota Amaz* 2:37–44.
- Nunes F de FV (2016) Sanidade de ostras (*Crassostrea rhizophorae*) cultivadas na reserva extrativista marinha Baía do Iguape, Bahia
- Oliveira MR, Costa EFS, Araújo AS, Pessoa EKR, Chellappa S (2012) Sex ratio and length-weight relationship for five marine fish species from Brazil. *J Mar Biol Oceanogr* 01:1–4.
- Oyetibo GO, Ige OO, Obinani PK, Amund OO (2021) Ecological risk potentials of petroleum hydrocarbons and heavy metals shape the bacterial communities of marine hydrosphere at Atlantic Ocean, Atlas Cove, Nigeria. *J Environ Manage* 289:1–9.
- Pan B, Wang Y, Li D, Wang T, Du L (2022) Tissue-specific distribution and bioaccumulation pattern of trace metals in fish species from the heavily sediment-laden Yellow River, China. *J Hazard Mater* 425:128050.
- Pena PGL, Northcross AL, Lima MAG de, Rêgo R de CF (2020) Derramamento de óleo bruto na costa brasileira em 2019: emergência em saúde pública em questão. *Cad Saude Publica* 36:1–6.
- Peñuela MM (2020) Ajustes fisiológicos de *Astyanax altiparanae* (Teleostei: Characiformes: Characidae) expostos a fármacos de preocupação emergente. Universidade de São Paulo
- Pimentel CF (2012) Avaliação dos teores de mercúrio em arraias (Elasmobranchiomorpha Rajiformes) capturadas na Baía de Todos os Santos. Universidade Federal da Bahia
- Pickett, S.T.A. and White, P.S. 1985. Natural disturbance and patch dynamics: an introduction. In: Pickett STA, White PS (eds) *The ecology of natural disturbance and patch dynamics*. Academic Press, Orlando, p 3–13.
- Pourret O, Hursthouse A (2019) It’s time to replace the term “heavy metals” with “potentially toxic elements” when reporting environmental research. *Int J Environ Res Public Health* 16:1–6.
- Qadir A, Malik RN (2011) Heavy Metals in Eight Edible Fish Species from Two Polluted Tributaries (Aik and Palkhu) of the River Chenab, Pakistan. *Biol Trace Elem Res* 143:1524–1540.

- Rangel, C.A., Chaves, L.C.T., Monteiro-Neto, C. (2007). Baseline assessment of the reef fish assemblage from Cagarras Archipelago, Rio de Janeiro, southeastern Brazil. *Braz. J. Oceanogr.* 55 (1), 7–17.
- Reddy CM, Nelson RK, Hanke UM, Cui X, Summons RE, Valentine DL, Rodgers RP, Chacón-Patiño ML, Niles SF, Teixeira CEP, Bezerra LEA, Cavalcante RM, Soares MO, Oliveira AHB, White HK, Swarthout RF, Lemkau KL, Radović JR (2022) Synergy of Analytical Approaches Enables a Robust Assessment of the Brazil Mystery Oil Spill. *Energy and Fuels* 36:13688–13704.
- Reis-Filho JA, Schmid K, Harvey ES, Giarrizzo T (2019) Coastal fish assemblages reflect marine habitat connectivity and ontogenetic shifts in an estuary-bay- continental shelf gradient. *Mar Environ Res* 148:57–66.
- Ricklefs R (2010) *Economia Natureza. A Econ da Nat*:255–262.
- Robins C, Ray G (1986) *Um guia de campo para os peixes da costa atlântica da América do Norte*. Company HM (ed) Boston, EUA.
- Salgado-Ramírez CA, Mansilla-Rivera I, Rodríguez-Sierra CJ (2017) Comparison of trace metals in different fish tissues of *Scomberomorus* spp. (“sierra”) and *Lutjanus synagris* (“arrayado”) from Jobos Bay and La Parguera coastal areas in Southern Puerto Rico. *Reg Stud Mar Sci* 13:1–11.
- Santana CO, Jesus TB, Aguiar WM, Jesus Sant’anna Franca-Rocha W, Soares CAC (2017) Assessment of health risk related to the ingestion of trace metals through fish consumption in Todos os Santos Bay. *Environ Monit Assess* 189:1–7.
- Sheikhzadeh H, Hamidian AH (2021) Bioaccumulation of heavy metals in fish species of Iran: a review. *Environ Geochem Health* 43:3749–3869.
- Silva CA da, Santos S de O, Garcia CAB, de Pontes GC, Wasserman JC (2020a) Metals and arsenic in marine fish commercialized in the NE Brazil: Risk to human health. *Hum Ecol Risk Assess* 26:695–712.
- Silva LSC, Picanço J de L, Calil JGS (2020b) O grande desastre esquecido: análise preliminar do derramamento de óleo na costa brasileira (agosto/2019 - março/2020) e seus impactos no litoral da Bahia. *Rev da UFMG* 27:54–79.
- Snyder SM, Pulster EL, Murawski SA (2019) Associations Between Chronic Exposure to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Health Indices in Gulf of Mexico Tilefish (*Lopholatilus chamaeleonticeps*) Post Deepwater Horizon. *Environ Toxicol Chem* 38:2659–2671.

- Soares MO, Teixeira CEP, Bezerra LEA, Rabelo EF, Castro IB, Cavalcante RM (2022) The most extensive oil spill registered in tropical oceans (Brazil): the balance sheet of a disaster. *Environ Sci Pollut Res* 29:19869–19877.
- Sousa AFR, Santos NB, Carvalho Neta RNF, Almeida Z da S (2017) Aspectos reprodutivos do peixe *Lutjanus synagris* (Perciformes, Lutjanidade) capturado na costa nordeste do Brasil. *Rev Bras Eng Pesca* 10:106–120.
- Souza CS, Mafalda Júnior P de O, Kikuchi RKP de, Dominguez JML (2022) Assessment of the brazilian coast oil spill impact in the fish eggs and larvae development from the tropical continental shelf. *Reg Stud Mar Sci* 56.
- Souza, A.T.D.E., Di, M., Ilarri, I., Medeiros, P.R.D.E., Gempel, G., Rosa, R.S., Sampaio, C.L.S. (2007). Zootaxa, fishes (Elasmobranchii and Actinopterygii) of Picaozinho reef, Northeastern Brazil, with notes on their conservation status. *Zootaxa* 19, 11–19.
- Taslina K, Al-Emran M, Rahman MS, Hasan J, Ferdous Z, Rohani MF, Shahjahan M (2022) Impacts of heavy metals on early development, growth and reproduction of fish – A review. *Toxicol Reports* 9:858–868.
- Trindade-Santos I, Freire K de MF (2015) Analysis of reproductive patterns of fishes from three Large Marine Ecosystems. *Front Mar Sci* 2:1–10.
- Vazzoler AEA de M (1996) *Biologia da reprodução de peixes teleósteos: teoria e prática*. EDUEM (ed) Universidade Estadual de Maringá, São Paulo. 169pp.
- Wolfe-Simon F, Blum JS, Kulp TR, Gordon GW, Hoeft SE, Pett-Ridge J, Stolz JF, Webb SM, Weber PK, Davies PCW, Anbar AD, Oremland RS (2011) A bacterium that can grow by using arsenic instead of phosphorus. *Science* (80-) 332:1163– 1167.

INFORMAÇÃO SOBRE A DISSERTAÇÃO

Esta dissertação foi elaborada em dois capítulos. O capítulo 1: *Estrutura populacional de peixes das famílias Lutjanidae e Haemulidae (Actinopterygii - Eupercaria/misc), em áreas afetadas pelo óleo na Bahia, Brasil*, segue as normas estabelecidas pela revista Marine Ecology e o capítulo 2: *Bioacumulação de elementos químicos em peixes de áreas afetadas por óleo no litoral da Bahia, Brasil*, segue as normas da revista Marine Pollution Bulletin.

Estrutura populacional de peixes das famílias Lutjanidae e Haemulidae (Actinopterygii - Eupercaria/misc), em áreas afetadas pelo óleo na Bahia, Brasil

Amanda da Silva Souza¹, Alexandre Clístenes de Alcântara Santos¹, Natália de Souza Silva¹,
Taise Bomfim de Jesus¹

¹Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, Bahia, Brasil.

Autor para correspondência: amandasouza.lic@gmail.com

Resumo

Distúrbios ambientais, como a entrada de poluentes em ecossistemas aquáticos, influenciam na estrutura populacional de peixes. Em 2019, houve o mais extenso derramamento de óleo no litoral do Brasil, e nesse contexto, o objetivo desse estudo foi avaliar a estrutura populacional de peixes ariacó *Lutjanus synagris* (Lutjanidae) e quatinga *Haemulon aurolineatum* (Haemulidae) em ambientes afetados por este distúrbio ambiental. Consideramos os aspectos biométricos, energéticos e reprodutivos de peixes em Itacaré (área menos afetada), Tinharé – Boipeba (área mais afetada) e Madre de Deus (área afetada cronicamente). Foram estimados o padrão de crescimento, o fator de condição (K), o índice hepatossomático (IHS) e o desenvolvimento gonadal das populações de cada sítio amostral. Foi avaliado o efeito do comprimento total, ontogenia, sexo, maturação e ambiente sobre o Ke IHS dos peixes através de Modelos Lineares Generalizados (GLM) para cada espécie. O padrão de crescimento foi alométrico negativo nas três populações de ariacó, enquanto, a quatinga teve crescimento diferente em cada ambiente. O ambiente teve maior efeito na condição corporal de ambas as espécies, sendo que o efeito negativo mais intenso foi constatado em Tinharé-Boipeba, a região mais afetada pelo derrame de óleo. O IHS teve influência ambiental somente no ariacó, sendo menor na população de Madre de Deus, região historicamente contaminada por óleo. Apenas *L. synagris* apresentou uma associação entre o desenvolvimento gonadal e o ambiente, havendo uma maior frequência de peixes imaturos em Madre de Deus, em maturação em Itacaré e em regressão em Tinharé - Boipeba. Os resultados indicam que o distúrbio do óleo pode estar influenciando nas mudanças dos aspectos populacionais das espécies, embora populações de áreas distintas possam apresentar variações em suas estruturas populacionais.

Palavras-chave: Biometria, reprodução, ictiofauna, estrutura populacional, fator de condição, petróleo.

1. INTRODUÇÃO

Populações de uma mesma espécie em localizações geográficas diferentes podem apresentar variação em suas características, uma vez que experimentam ambientes distintos, e tais diferenças refletem ajustes entre os organismos e seus respectivos ambientes (Begon et al. 2007). Contudo, a pressão seletiva decorrente da contaminação ambiental tem provocado à diferenciação entre as populações (Lawrence & Hemingway 2003). Os distúrbios antropogênicos causam impactos em todos os níveis hierárquicos, causando mudanças abruptas na estrutura das populações e comunidades biológicas (Battisti et al. 2016).

Devido às condições estressantes em ambientes perturbados, os peixes apresentam maior estresse oxidativo e mudanças em aspectos populacionais, como a redução no tamanho corporal (Ondei et al. 2020), mortalidade dos organismos, redução das reservas energéticas (Bender et al. 2016, Ainsworth et al. 2018, Imorou et al. 2019), alteração no desenvolvimento das gônadas (Prado 2010, Arukwe & Goksoyr 2012) e diminuição da capacidade reprodutiva (Franco-Fuentes et al. 2021). Portanto, a entrada de poluentes em ecossistemas aquáticos impacta o desenvolvimento, crescimento e reprodução dos peixes (Taslina et al. 2022).

Em 2019, houve o maior derramamento de óleo no litoral do Brasil, em termos de extensão territorial, que atingiu os estados do nordeste e sudeste do país (De Andrade & Coutinho 2022). Esses derrames são fontes de entrada de poluentes nos ecossistemas, como hidrocarbonetos e metais, que alteram as condições do habitat, provocam distúrbios nas reações metabólicas, desequilíbrio hormonal (Oyetibo et al. 2021) e efeitos indiretos nos peixes, devido aos impactos nas redes tróficas (Peterson et al. 2003). O petróleo é uma fonte de estresse que provoca a redução na alimentação (Ibemenuga 2013), no comprimento de larvas de peixes (Hansen et al. 2019, Tairova et al. 2019) e no crescimento corporal desses organismos (Ainsworth et al. 2018).

O derrame de petróleo na costa brasileira é considerado um distúrbio antropogênico, dada às mudanças nas condições ambientais e aos impactos na biota (Soares & Rabelo 2023). Foi registrado aumento nas anormalidades morfológicas no ictioplâncton, assim como uma redução na abundância, riqueza e tamanho das larvas de peixes associados ao derramamento de óleo de 2019 no litoral da Bahia. Portanto, os impactos no ictioplâncton se refletem no recrutamento e na distribuição espacial das populações de peixes (Souza 2022).

Os atributos reprodutivos são importantes para a avaliação da qualidade ambiental, pois, podem ser indicadores de condições adversas e contribuir para o gerenciamento e conservação das espécies (Caramaschi & Brito 2021). Nesse sentido, estudar os aspectos biométricos, energéticos e reprodutivos de peixes em diferentes áreas afetadas pelo distúrbio do óleo pode contribuir para o conhecimento da dinâmica populacional, além de permitir a obtenção de novas informações sobre os aspectos das populações das espécies nas localidades estudadas. A avaliação do investimento energético na reprodução em condições adversas é uma abordagem pouco explorada que pode indicar o quanto as espécies canalizam energia ao longo do ciclo mediante à estocasticidade ambiental (Röpke et al. 2019; Osri et al. 2016). Esse estudo apresenta a primeira avaliação da estrutura populacional de peixes após o derrame de óleo na costa brasileira, a qual pode colaborar para a compreensão dos impactos desse distúrbio em diferentes espécies e populações.

A relação peso e comprimento (LWR) permite avaliar o padrão de crescimento e dinâmica das populações de peixes em termos energéticos. A partir dessa relação pode ser calculado o fator de condição, um indicador das reservas energéticas, do bem-estar individual e da condição fisiológica do peixe, traduzida pela variação do peso do indivíduo em relação ao comprimento (Camara et al. 2011; Caramachi & Brito 2021). A LWR pode ser afetada pela condição ambiental, estresse ambiental, disponibilidade de alimento e tipo de habitat. Esses estudos são importantes para o conhecimento da estrutura de populações de diferentes regiões (Çiçek et al. 2022).

Nossa hipótese é que os ambientes com diferente intensidade de contaminação por óleo desencadeiam variação nos aspectos populacionais dos peixes. Nesse sentido, o objetivo desse estudo foi caracterizar os aspectos biométricos, reprodutivos e fisiológicos das populações de *Lutjanus synagris* e *Haemulon aurolineatum* em cada sítio amostral, considerando a forma, pela qual, cada um deles foi afetado pelo óleo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

As áreas de coleta dos peixes foram o arquipélago Madre de Deus, Tinharé - Boipeba e Itacaré no litoral da Bahia (Figura 1). Com 21 a 30 ocorrências de óleo em Cairu, as ilhas de Tinharé e Boipeba, foram escolhidas para análise dos peixes afetados diretamente pelo acidente com o óleo no litoral. A ilha Madre de Deus, por sua vez, localizada na Baía de Todos os Santos (BTS), é uma área historicamente contaminada por atividades petrolíferas, portanto, considerou-se o ambiente afetado de forma crônica. E Itacaré, localizada no litoral sul da Bahia, foi escolhida por ser considerada a região menos afetada pelo óleo, em função do menor registro de ocorrência de óleo (1 a 10) na região (Silva et al. 2020).

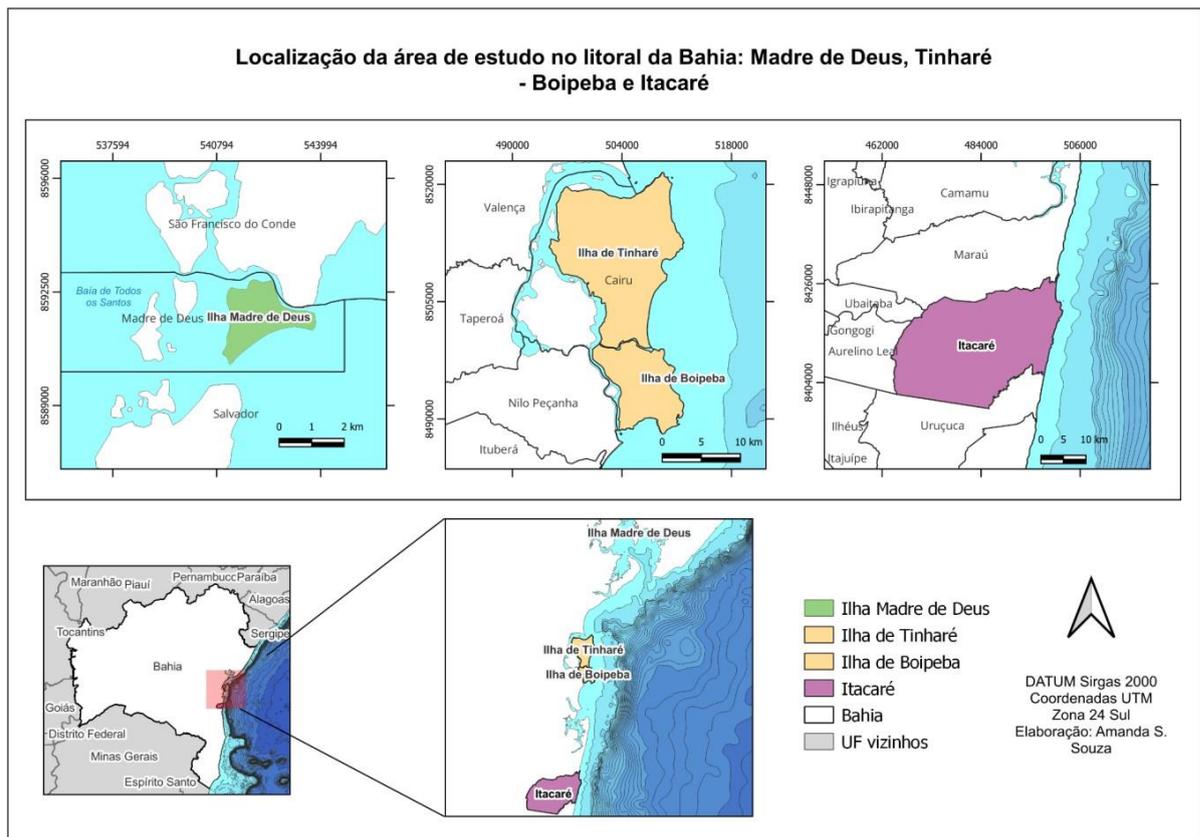


Figura 1. Localização da área de estudo no litoral da Bahia: Madre de Deus, Tinharé-Boipeba e Itacaré.

2.2 Coleta de dados

Os peixes estudados fazem parte do banco de dados do laboratório de Ictiologia da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS) e obtidos como parte do Projeto “Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) em Ambientes Marinhos Tropicais – AmbTropic – fase II”. As espécies do estudo são *Lutjanus synagris* (n = 87) e *Haemulon aurolineatum* (n = 66), obtidas por pescadores de cada localidade (Itacaré, Tinharé - Boipeba e Madre de Deus) em fevereiro, abril, junho e julho de 2021, sendo as capturas realizadas com linha de mão. O comprimento total dos peixes foi mensurado em malha milimetrada, e o peso corpóreo na balança analítica no laboratório de Ictiologia (UEFS). Foi realizada a abertura dos peixes conforme a metodologia de dissecação proposta por Caramaschi & Brito 2021. A partir da observação macroscópica das gônadas foram feitas as identificações do sexo e dos estágios de maturação, considerando cor, formato, vascularização, visibilidade dos ovócitos, presença de esperma, volume em relação à cavidade abdominal e espessura da parede das gônadas (Vazzoler 1996, Brown-Peterson et al. 2011). O fígado dos indivíduos de ambas as espécies foi coletado e pesado em balança analítica para a realização do cálculo do índice somático.

2.3 Análise de dados

Os dados foram analisados utilizando o software R (versão 4.2.1, 2022). Para verificar se os valores do comprimento total e peso corpóreo se diferenciaram entre machos e fêmeas utilizou-se o teste de Mann-Whitney. Os parâmetros da relação entre peso e comprimento foram determinados usando o modelo de regressão linear: $\log W = \log a + b \log L$, onde W (peso), a (coeficiente linear da regressão), L (comprimento total) e b (coeficiente alométrico). Para determinar o tipo de crescimento dos peixes foi realizado o teste-t, considerando $b = 3$ (crescimento isométrico) e $b \neq 3$ (crescimento alométrico).

As fases do ciclo reprodutivo dos peixes foram definidas a partir da classificação macroscópica das gônadas: imaturo (fase I), em maturação (fase II), maduro (fase III), em regressão (fase IV) e em regeneração (fase V). Classificamos os estágios de reprodução em reprodutivo (fase III) e não reprodutivo (fases I, II, IV e V) (Brown-Peterson et al. 2011). A proporção sexual foi calculada pelo quociente entre o número de machos e de fêmeas das espécies de peixes estudadas. Posteriormente foi aplicado o teste do qui-quadrado para testar as possíveis diferenças na proporção sexual estabelecida. Esse teste estatístico também foi utilizado para avaliar a variação na frequência dos estágios de maturação dos peixes entre as populações de cada localidade amostrada.

Para estimar o tamanho da primeira maturação (L50) dos peixes foi realizado o modelo de regressão logística. Os estágios de maturação foram agrupados em imaturos (fase I) e em maduros (fases II, III, IV e V) usando o pacote *sizeMat*. Foi calculado o L50 para os sexos agrupados, e para machos e fêmeas de cada espécie. A partir dos valores estimados foi realizada a classificação dos peixes quanto à fase ontogenética (juvenil e adulto).

A partir da relação peso-comprimento foi calculado o fator de condição (K) dos peixes pela fórmula $K=L/W^b$. O índice hepatossomático (IHS) foi obtido a partir do peso do fígado (Wf) e do peso corpóreo (W) conforme a fórmula: $IHS=Wf/W*100$. Foi aplicado o teste de Mann-Whitney para avaliar as diferenças nos índices entre os juvenis e adultos, e entre machos e fêmeas. Aplicou-se o teste de Kruskal-Wallis e post-hoc de Dunn após a análise da normalidade e homocedasticidade dos dados, para avaliar a variação desses índices entre as populações em diferentes áreas e entre os diferentes estágios de maturação gonadal utilizando o pacote *rstatix*.

Para avaliar o efeito das variáveis combinadas (comprimento total, ontogenia, sexo, maturação e ambiente) sobre fator de condição dos peixes foram realizados Modelos Lineares Generalizados (GLM) para cada espécie. Foram utilizadas as funções de distribuição Gamma e de ligação logarítmica para relacionar o índice com as preditoras. O índice hepatossomático

também foi modelado, com distribuição Gamma para *Lutjanus synagris* e distribuição Gaussiana para *Haemulon aurolineatum*, e a análise da significância dos modelos foi realizada gradualmente (Lloret et al. 2002).

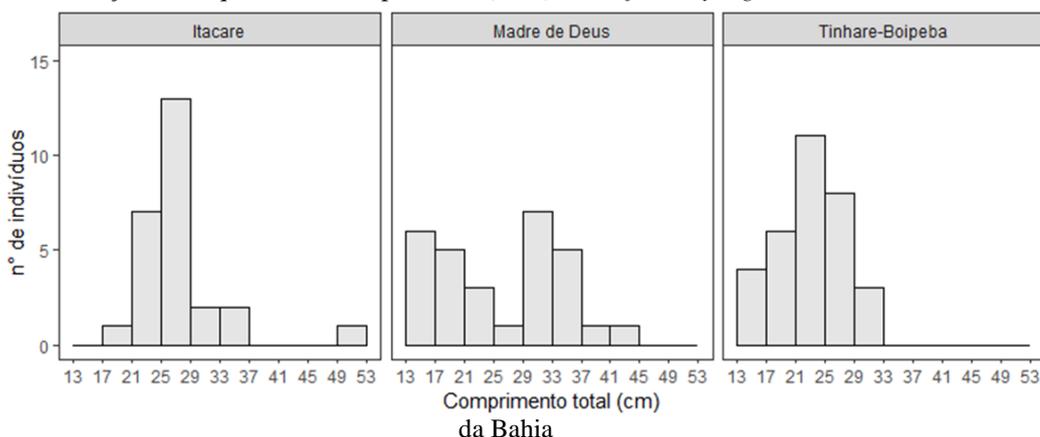
3. RESULTADOS

3.1 Estrutura das populações quanto aos aspectos biométricos

A biometria foi realizada em 153 peixes. O comprimento total (TL) dos peixes *L. synagris* variou entre 13,1 e 50 cm ($25,6 \pm 6,8$ cm) e *H. aurolineatum* entre 11,0 e 19,5 cm ($15,5 \pm 2,4$ cm). O peso da primeira espécie variou entre 35,5 g e 1.006,0 g ($285,0 \pm 199,0$ g) e a segunda, entre 20,8 g e 105,0 g ($53,6 \pm 23,4$ g). As fêmeas de *L. synagris* apresentaram TL e peso maiores (fêmeas: $25,7 \pm 6,3$ cm e $286,0 \pm 192,0$ g, e machos: $23,3 \pm 6,7$ cm e $217,0 \pm 162,0$ g), no entanto, essa variação não foi significativa ($p > 0,05$). Em *H. aurolineatum* o TL foi o mesmo e o peso maior nos machos (fêmeas: $16,5 \pm 2,4$ cm e $62,6 \pm 23,1$ g e machos $16,5 \pm 1,8$ cm e $63,9 \pm 18,0$ g), mas estatisticamente não houve variação entre os grupos ($p > 0,05$).

Na análise da distribuição de frequência do comprimento (LDF) nas populações de *L. synagris*, constatou-se maior número de indivíduos em Itacaré na classe de TL (25-29 cm) e em Tinharé – Boipeba (21-25 cm). Em Madre de Deus, há uma maior distribuição do comprimento entre as classes, com destaque nos TL (29-33 e 13-17 cm) (Figura 2). Nas populações de *H. aurolineatum*, a maior frequência do TL em Itacaré foi na classe (16-17 cm), em Madre de Deus (12-13 cm) e em Tinharé – Boipeba (17-18 cm e 18-19 cm) (Figura 3).

Figura 2. Distribuição da frequência de comprimento (LFD) de *Lutjanus synagris* em diferentes áreas do litoral



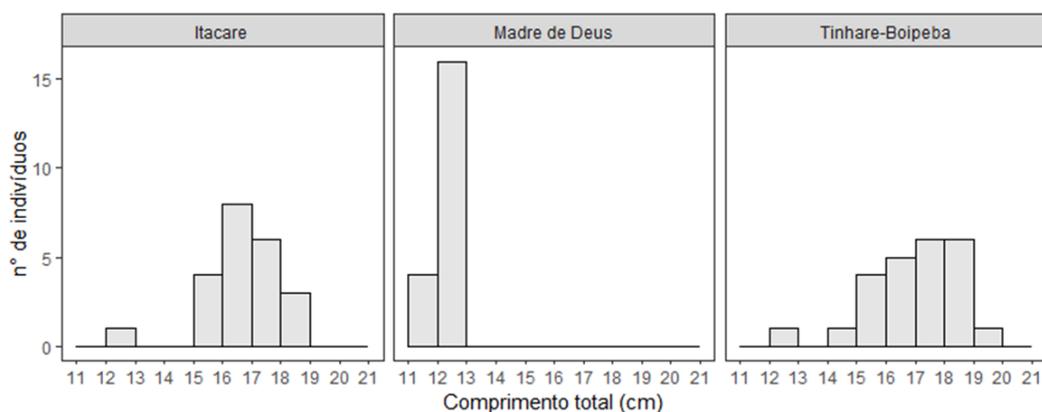


Figura 3. Distribuição da frequência de comprimento (LFD) de *Haemulon aurolineatum* em diferentes áreas do litoral da Bahia

A análise de variância mostrou que há diferença entre os valores biométricos das populações de *Lutjanus synagris* em Itacaré e Tinharé - Boipeba ($p < 0,05$). O TL e o peso corpóreo foram maiores em Itacaré (27,7 cm e 308,0 g) enquanto em Tinharé - Boipeba apresentou menores valores (22,4 cm e 171,0 g). O padrão foi diferente nos peixes *Haemulon aurolineatum*, houve variação no TL e peso entre os peixes em Madre de Deus em relação às demais populações ($p < 0,01$), a qual apresentou menor peso e TL (12,4 cm e 25,2 g) (Figuras 4 e 5).

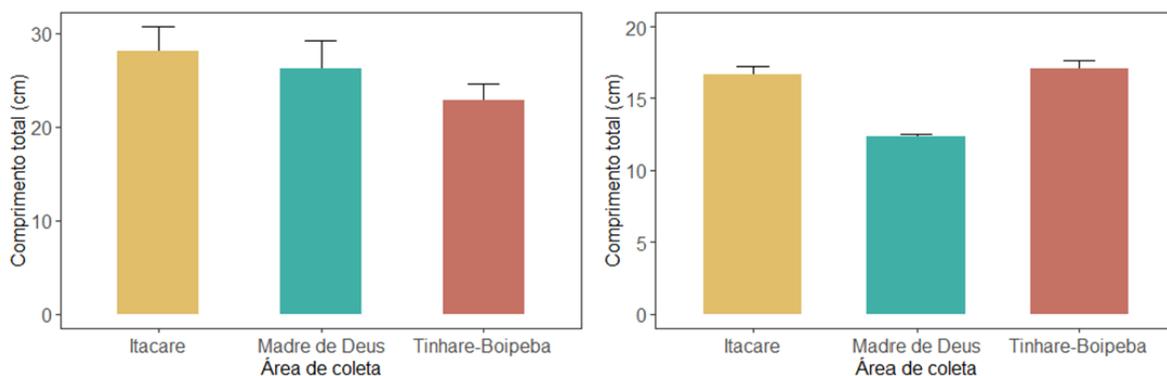


Figura 4. Comprimento total dos peixes *Lutjanus synagris* e *Haemulon aurolineatum* em diferentes áreas do litoral da Bahia com intervalo de confiança 95%

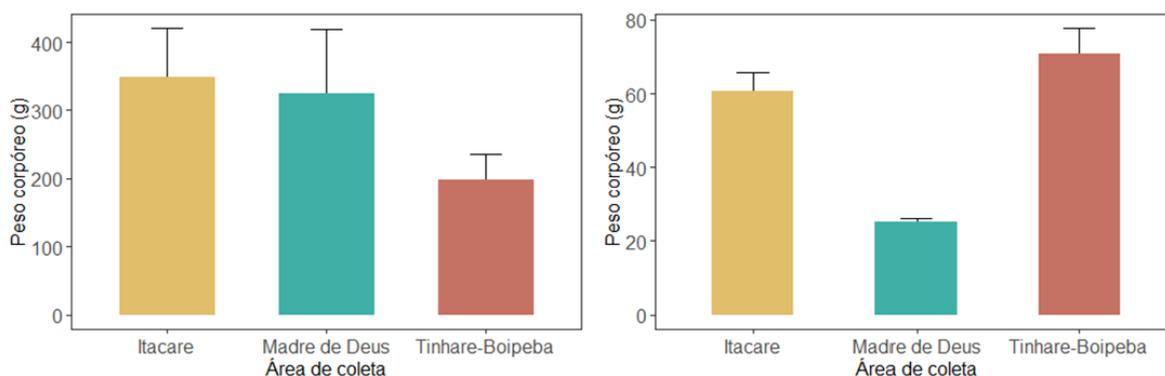


Figura 5. Peso corpóreo dos peixes *Lutjanus synagris* e *Haemulon aurolineatum* em diferentes áreas do litoral da Bahia com intervalo de confiança 95%

A relação comprimento e peso (LWR) dos peixes foi altamente significativa em *L. synagris* ($p < 0,001$, $r^2 = 0,98$) e *H. aurolineatum* ($p < 0,001$, $r^2 = 0,96$). Ambas as espécies apresentaram o coeficiente alométrico (b) significativamente diferente de 3, indicando que não apresentam crescimento isométrico. A alometria no crescimento foi constatada em fêmeas e machos nas duas espécies. O valor de b não diferiu entre machos e fêmeas de *L. synagris* ($t = 0,749$; $p > 0,05$) e de *H. aurolineatum* ($t = -0,071$; $p > 0,05$).

Considerando as populações de *L. synagris* de cada área de coleta, o peso se manteve relacionado com o comprimento ($p < 0,001$, $r^2 \geq 0,94$). Os coeficientes alométricos dos peixes em Itacaré ($b = 2,38$), Tinhare-Boipeba ($b = 2,93$) e Madre de Deus ($2,86$) foram menores que 3. Isso indica que as três populações apresentam crescimento alométrico negativo. Contudo, analisando *H. aurolineatum*, apenas as populações em Itacaré e em Tinhare - Boipeba apresentaram uma relação significativa entre o peso e comprimento ($p < 0,001$, $r^2 = 0,84$ e $0,95$). Os peixes em Itacaré apresentaram crescimento alométrico negativo ($b = 2,95$), e os peixes em Tinhare – Boipeba, crescimento alométrico positivo ($b = 3,24$) (Tabela 1).

Tabela 1. Parâmetros da regressão da relação peso - comprimento (LWR) e padrão de crescimento de peixes do litoral da Bahia

População	n	Comprimento total (cm)	Peso (g)	a	b	R ²	p	Padrão de crescimento
LS - Itacare	26	20,8 - 50,0	162,9 - 1.006,5	0,117	2,377	0,94	<0,001	A-
LS- Madre de Deus	28	15,1 - 42,8	51,5 - 847,9	0,024	2,829	0,99	<0,001	A-
LS-Tinhare-Boipeba	32	13,1 - 31,4	35,5 - 470,1	0,018	2,928	0,99	<0,001	A-
HA-Itacaré	22	12,6 - 18,7	39,2 - 94,7	0,014	2,950	0,84	<0,001	A-
HA-Madre de Deus	18	11,0 - 12,8	21,4 - 29,4	1,557	1,108	0,20	0,04	PA

LS= *Lutjanus synagris*, HA = *Haemulon aurolineatum*, n = tamanho amostral, a = coeficiente linear, b = coeficiente alométrico, R² = coeficiente de determinação, A- = alometria negativa, A+ = alometria positiva, PA = Ausência de padrão.

3.2 Estrutura das populações quanto aos aspectos reprodutivos

Nesse estudo, o tamanho da primeira maturidade sexual de *L. synagris* foi 18,0 cm nas fêmeas e 18,5 cm nos machos, e de *H. aurolineatum* foi 13,7 cm nas fêmeas e 12,5 cm nos machos. A partir das observações macroscópicas das gônadas constataram-se indivíduos em quatro estádios de maturação: imaturo (fase I), em maturação (fase II), em regressão (fase IV) e em regeneração (fase V). Em ambas as espécies não foram identificados indivíduos em estágio reprodutivo ativo (fase III).



Figura 6. Estágios de desenvolvimento gonadal de fêmeas de *Lutjanus synagris* (a) imaturo (b) em maturação (c) em regressão e (d) em regeneração

Em *L. synagris* houve uma associação entre o desenvolvimento gonadal e o ambiente ($X^2 = 25,77$, $p < 0,001$). Há uma maior frequência da fase I em Madre de Deus, da fase II em Itacaré e da fase IV em Tinharé - Boipeba. Enquanto em *H. aurolineatum* não houve diferença entre as frequências dos estágios de maturação entre as populações de peixes ($X^2 = 1,2$, $p=0,7$) (Figura 7).

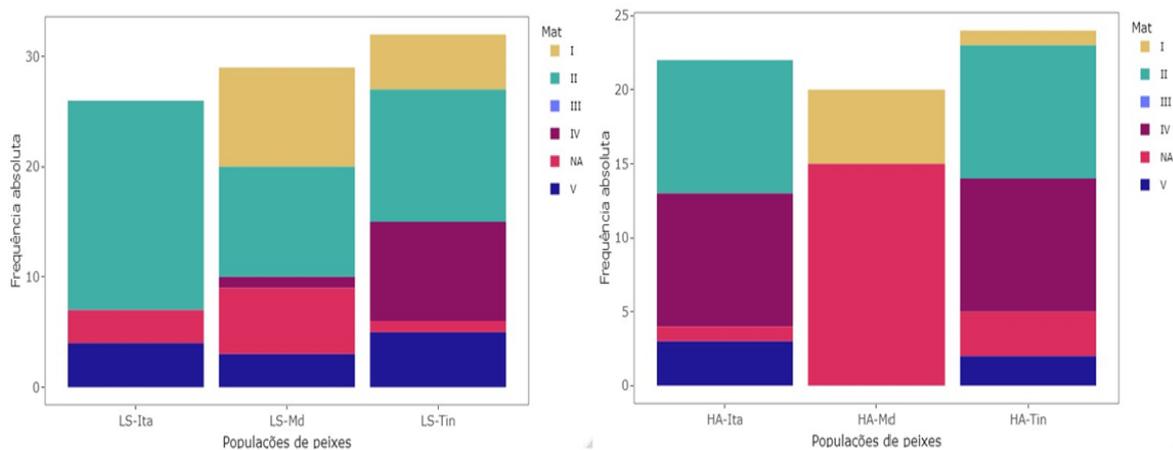


Figura 7. Frequência absoluta dos estágios de maturação nas populações de peixes de *Lutjanus synagris* e *Haemulon aurolineatum* do litoral da Bahia

LS-Ita = *Lutjanus synagris* em Itacaré; **LS-Md** = *Lutjanus synagris* em Madre de Deus; **LS-Tin** = *Lutjanus synagris* em Tinharé – Boipeba; **HA-Ita** = *Haemulon aurolineatum* em Itacaré; **HA-Md** = *Haemulon aurolineatum* em Madre de Deus; **HA-Tin** = *Haemulon aurolineatum* em Tinharé – Boipeba. **I** = imaturo, **II** = em maturação, **III** = maturo, **IV** = em regressão, **V** = em regeneração, **NA** = não identificado.

A fase adulta foi o estágio ontogenético predominante em ambas as espécies. *Lutjanus synagris* em Itacaré (100%), Madre de Deus (69%) e Tinharé – Boipeba (84,4%) e *H. aurolineatum* em Itacaré (100%) e em Tinharé – Boipeba (95,8%). Em Madre de Deus o padrão foi diferente, os juvenis (60%) predominaram sobre os adultos (Figura 8).

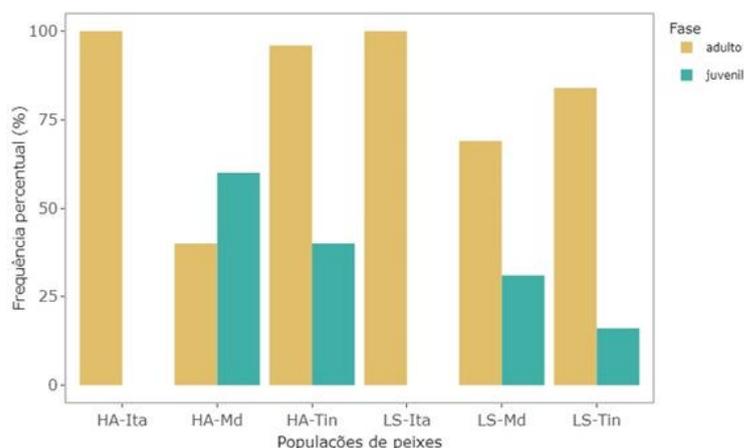


Figura 8. Frequência percentual das fases ontogenéticas nas populações de peixes do litoral da Bahia.

HA-Ita = *Haemulon aurolineatum* em Itacaré; **HA-Md** = *Haemulon aurolineatum* em Madre de Deus; **HA-Tin** = *Haemulon aurolineatum* em Tinharé – Boipeba; **LS-Ita** = *Lutjanus synagris* em Itacaré; **LS-Md** = *Lutjanus synagris* em Madre de Deus; **LS-Tin** = *Lutjanus synagris* em Tinharé – Boipeba; **HA-Ita** = *Haemulon aurolineatum* em Itacaré;

O reconhecimento do sexo foi realizado em 120 peixes. Na espécie *L. synagris*, as fêmeas (n = 60; 73,2%) predominaram sobre os machos (n = 22; 26,8%). A proporção sexual

foi de 0,37 macho para 1 fêmea, com diferença significativa ao nível de 1% ($X^2 = 17,61$). E na espécie *H. aurolineatum* houve uma predominância de machos ($n = 27$; 57,4%) sobre as fêmeas ($n = 20$; 42,5%), com a proporção sexual de 1,35 macho para 1 fêmea. No entanto, estatisticamente essa predominância não foi significativa ($X^2 = 1,04$, $p > 0,05$).

3.3 Estrutura das populações quanto aos índices fisiológicos

A amplitude do fator de condição (K) de *Lutjanus synagris* foi de 0,015 a 0,146 ($0,050 \pm 0,045$). O fator de condição dos peixes apresentou variação ($p < 0,001$) entre todas as populações. Nessa espécie, os peixes em Itacaré possui o maior fator de condição ($K = 0,117$), seguido em Madre de Deus ($K = 0,022$) e em Tinharé – Boipeba ($K = 0,018$) (Figura 8).

Na espécie *Haemulon aurolineatum*, só foi possível calcular o fator de condição (K) das populações em Itacaré e Tinharé - Boipeba, pois a população em Madre de Deus apresentou fraca correlação entre o peso e comprimento. O valor de K variou de 0,006 a 0,016 ($0,010 \pm 0,003$). Houve diferença significativa ($p < 0,001$) entre as populações nos diferentes ambientes, sendo os peixes em Itacaré que apresentaram maior índice ($K = 0,013$) do que em Tinharé – Boipeba ($K = 0,007$) (Figura 9).

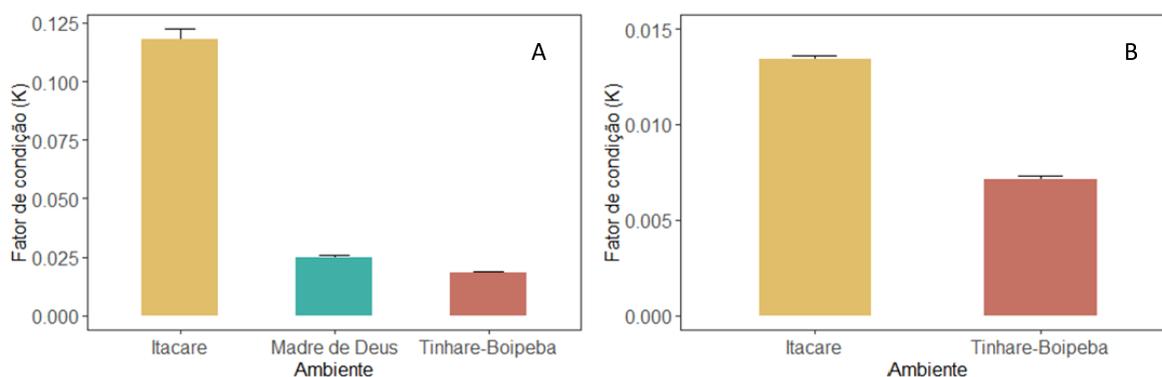


Figura 9. Fator de condição de *Lutjanus synagris* (A) e *Haemulon aurolineatum* (B) em diferentes ambientes do litoral da Bahia com intervalo de confiança 95%

Os peixes *L. synagris* apresentaram variação no fator de condição entre os estágios de maturação ($p = 0,003$). Na fase II apresentaram maior valor ($K = 0,026$) do que na fase IV ($K = 0,019$). A condição dos peixes em diferentes estágios de maturação não variou significativamente na espécie *H. aurolineatum* ($p=0,29$). Não houve variação no valor de K entre fêmeas e machos, juvenis e adultos em ambas as espécies ($p>0,05$).

Os GLM com as preditoras combinadas mostraram que o ambiente apresentou efeito negativo sobre o fator de condição nas espécies estudadas, e o comprimento total dos peixes apresentou efeito positivo no índice apenas em *L. synagris*. Os coeficientes negativos da estimativa do efeito em *L. synagris* indicam que o ambiente apresenta efeito negativo sobre o

fator de condição, sendo os peixes em Madre de Deus e Tinharé - Boipeba com menores condições em relação à população em Itacaré. Destaca-se que o efeito negativo da condição em Tinharé - Boipeba foi mais intenso em ambas as espécies.

Tabela 2. Parâmetros e valores de p estimados usando um Modelo Linear Generalizado explicando a relação do fator de condição dos peixes *L. synagris* com as variáveis preditoras: comprimento total, estágio de maturação (Fase I, II, IV e V) e o ambiente (Itacaré, Madre de Deus e Tinharé-Boipeba).

	Estimativa do efeito	Erro padrão	p-valor
Intercepto	-2.269077	0.053112	<0,0001
Comprimento total	0.005443	0.002598	0.0399
Maturacao Fase II ¹	-0.017953	0.042743	0.6758
Maturacao Fase IV ¹	-0.036360	0.047866	0.4501
Maturacao Fase V ¹	-0.039446	0.042794	0.3599
Ambiente Madre de Deus ²	-1.525181	0.028347	<0,0001
Ambiente Tinharé-Boipeba ²	-1.823473	0.027350	<0,0001

¹Diferença da Maturação Fase I

²Diferença do Ambiente Itacaré

Tabela 3. Parâmetros e valores de p estimados usando um Modelo Linear Generalizado explicando a relação do fator de condição dos peixes *H. aurolineatum* com as variáveis preditoras: comprimento total, estágios de maturação (Fase I, II, IV e V) e ambiente (Itacaré e Tinharé-Boipeba).

	Estimativa do efeito	Erro padrão	p-valor
Intercepto	-4.20736	0.32028	<0,0001
Comprimento total	-0.01497	0.02445	0.5443
Maturacao Fase II ¹	0.20837	0.18419	0.2659
Maturacao Fase IV ¹	0.18236	0.19999	0.3683
Maturacao Fase V ¹	0.36087	0.19521	0.0732
Ambiente Tinharé-Boipeba ²	-0.69168	0.04640	<0,0001

¹Diferença da Maturação Fase I

²Diferença do Ambiente Itacaré

A análise de variância do índice hepatossomático (IHS) em *L. synagris* mostrou diferença significativa entre os ambientes ($X^2=11,53$, $p=0,003$) e entre os sexos ($X^2=5,17$, $p=0,02$). Os peixes em Madre de Deus apresentaram menor valor (IHS=0,162) em relação a Tinharé - Boipeba (IHS=0,297) e Itacaré (IHS=0,34), e os machos obtiveram menor índice (IHS=0,178) do que as fêmeas (IHS=0,299). Os coeficientes estimados no GLM com as preditoras combinadas mostram que apenas o ambiente apresenta influência sobre o IHS em *L. synagris*, indicando a intensidade do efeito negativo. Madre de Deus influenciou significativamente na redução do índice hepatossomático.

Foi calculado o IHS em *H. aurolineatum* apenas nos peixes em Itacaré e Tinharé-Boipeba, portanto, o teste t mostrou que não houve variação no índice entre as populações ($t =$

-1,27, $p = 0.21$). Assim como, a análise do GLM mostrou que nenhuma variável preditora exerceu efeito significativo sobre o índice hepatossomático na espécie supracitada.

Tabela 4. Parâmetros e valores de p estimados usando um Modelo Linear Generalizado explicando a relação do índice hepatossomático dos peixes *L. synagris* com as variáveis preditoras: ambiente (Itacaré, Madre de Deus e Tinharé-Boipeba) e sexo (machos e fêmeas).

	Estimativa do efeito	Erro padrão	p-valor
Intercepto	-0,9500	0,1229	<0,0001
Ambiente Madre de Deus ¹	-0,4149	0,178	0,0224
Ambiente Tinharé-Boipeba ¹	-0,0731	0,1646	0,6583
Sexo Macho ²	-0,2633	0,162	0,1081

¹Diferença do Ambiente Itacaré

²Diferença do Sexo Fêmea

Tabela 5. Parâmetros e valores de p estimados usando um Modelo Linear Generalizado explicando a relação do índice hepatossomático dos peixes *H. aurolineatum* com as variáveis preditoras: comprimento total, estágio de maturação (Fase I, II, IV e V) e o ambiente (Itacaré, Madre de Deus e Tinharé-Boipeba).

	Estimativa do efeito	Erro padrão	p-valor
Intercepto	0,2289	0,398	0,569
Comprimento total	0,0114	0,0239	0,636
Maturacao Fase IV ¹	0,0746	0,0595	0,218
Maturacao Fase V ¹	-0,0175	0,0793	0,826
Ambiente Tinharé-Boipeba ²	0,061	0,0523	0,251
Sexo Macho ³	0,0104	0,0512	0,84

¹Diferença da Maturação Fase I

²Diferença do Ambiente Itacaré

³Diferença do Sexo Fêmea

4. DISCUSSÃO

4.1 Estrutura das populações quanto aos aspectos biométricos

O valor máximo do comprimento total (TL) de *L. synagris* foi 50,0 cm, e de *H. aurolineatum* foi 19,5 cm. A primeira espécie pode alcançar até 60 cm de TL (Allen 1985), sendo considerada espécie de maior porte, quando comparada a segunda, que não ultrapassa 25 cm de TL (Robins & Ray 1986). Estes dados indicam uma amostragem representativa em relação ao tamanho dos indivíduos capturados. As diferenças morfológicas entre espécies são resultados de processos evolutivos, pois o nicho de cada uma é selecionado a partir de seus atributos morfológicos (Souza et al., 2021). Espécies diferentes apresentam variação também nas características fisiológicas e nas respostas de biomarcadores à poluição ambiental (Peñuela 2020).

Não houve diferença no tamanho, comprimento e peso entre fêmeas e machos em ambas as espécies. Não há dimorfismo sexual, porém, geralmente as fêmeas são mais pesadas devido a maior massa dos ovários (Cavalcante et al. 2012). No entanto, a ausência de

diferença entre os sexos nesse estudo pode ser justificada pela ausência de peixes em estágio reprodutivo ativo.

O comprimento e peso de *H. aurolineatum* foram menores em Madre de Deus do que nas demais populações ($p < 0,05$). Esse padrão pode ser explicado pela composição ontogenética da população, que é constituída majoritariamente por juvenis. Em relação a *L. synagris*, os peixes em Tinharé – Boipeba (mais afetada pelo óleo) foram menores em comprimento e peso em relação aos peixes coletados em Itacaré ($p < 0,05$). Esse resultado pode indicar que as condições ambientais em Tinharé-Boipeba foram menos favoráveis ao crescimento dos peixes do que em Itacaré. A variabilidade espacial no tamanho de peixes é resultado das condições do habitat, sobretudo da qualidade da água, disponibilidade de alimento e do nível do distúrbio antropogênico (Imorou et al. 2019). Em ambas as espécies, os menores valores médios para peso e comprimento foram registrados em áreas mais críticas em relação à presença de óleo, seja a área cronicamente afetada para *H. aurolineatum*, ou na área mais afetada pelo acidente no litoral para *L. synagris*.

Sugere-se que o distúrbio do óleo pode ter contribuído para a redução dos aspectos biométricos nos peixes, como observado em peixes após o derrame no mar do Alasca, que apresentaram redução no crescimento devido à ingestão de hidrocarbonetos derivados do petróleo (Short 2017). Os metais presentes no petróleo podem provocar também essas mudanças morfológicas nos peixes (Qadir & Malik 2011). Outro estudo com peixes recifais e demersais identificou impactos no crescimento e mortalidade associados à limitação de recursos provocada pelo petróleo (Ainsworth et al. 2018). Soares and Rabelo (2023) relataram vários estudos identificando manchas de óleo e/ou contaminação por hidrocarbonetos aromáticos em peixes, crustáceos, moluscos e organismos zooplânctônicos, mortalidade de crustáceos e redução na abundância de poliquetas, após o derrame de óleo na costa brasileira. Na medida em que, o derramamento de óleo também pode afetar presas das espécies, é esperado que aspectos biométricos das mesmas possam ser afetados.

Neste estudo, *L. synagris* e *H. aurolineatum* apresentaram alta relação entre peso e comprimento (LWR). Considerando as populações de diferentes ambientes, o peso dos peixes na primeira espécie se manteve fortemente relacionado com o comprimento, no entanto, a população de *H. aurolineatum* em Madre de Deus não apresenta esse padrão. É um indicativo que existem outros fatores bióticos/abióticos que estão influenciando mais no peso do que o comprimento. A LWR apresenta variação inter e intraespecífica, que depende das condições ambientais, do estágio de maturação gonadal e da fase ontogenética (Camara et al. 2011). Essa população é constituída de forma majoritária por juvenis, isso pode explicar a alteração

no padrão de crescimento. Indivíduos que ainda não atingiram a primeira maturação gonadal crescem em comprimento em uma proporção maior do que crescem em outras dimensões, tornando a LWR diferente dos peixes maiores (Froese et al. 2006; Gomiero et al. 2010).

O padrão de crescimento foi alométrico negativo nas três populações de *L. synagris*. A alometria negativa significa que os peixes ganham mais incremento em comprimento do que em peso, e a alometria positiva indica que aumentam mais em peso do que em comprimento (Hasan et al. 2021). A alometria negativa foi constatada também na mesma espécie no litoral da Bahia (Freitas 2009) e do Maranhão (Sousa et al. 2017). *H. aurolineatum* teve crescimento diferente em cada ambiente: Itacaré (alometria negativa), Tinharé – Boipeba (alometria positiva) e Madre de Deus (ausência de padrão). Essa mesma espécie na Venezuela apresentou crescimento alométrico negativo. A variação espacial dos padrões de crescimento é explicada pelas diferenças na disponibilidade de alimento e nas condições dos habitats (Bravo et al. 2009, Sousa et al. 2017, Imorou et al. 2019).

4.2 Estrutura das populações quanto aos aspectos reprodutivos

A maturidade sexual de *L. synagris* nesse estudo (L50 de fêmeas: 18,0 cm e machos: 18,5 cm) foi similar ao encontrado na mesma espécie no Banco de Abrolhos, Bahia (L50 de fêmeas: 18,1 cm e machos: 18,7 cm) (Trindade-Santos & Freire 2015). A maturidade sexual em *H. aurolineatum* (L50 de fêmeas: 13,7 cm e machos: 12,5 cm) foi menor do que na espécie em Pernambuco (L50 de fêmeas: 15,0 cm e machos: 15,3 cm) (Lessa et al. 2004), salienta-se que não há registro do comprimento da primeira maturação na Bahia. Uma mesma espécie pode apresentar variação no tamanho da primeira maturação, essa plasticidade está associada a questões genéticas e variáveis ambientais (Sousa et al. 2017).

Nas duas espécies foram identificados peixes imaturos (fase I), em maturação (fase II), em regressão (fase IV) e em regeneração (fase V). Na fase I, os peixes são imaturos, e na fase II, as gônadas começam a se desenvolver, porém, os ovários não estão prontos para desova. A fase IV é conhecida como esvaziada, indica a conclusão do ciclo reprodutivo, e na fase V, estão se recuperando e preparando para o próximo ciclo. Embora os peixes estejam sexualmente maduros, estão reprodutivamente inativos (Brown-Peterson et al. 2011).

As espécies desse estudo se reproduzem durante todo o ano, sendo que na região nordeste do Brasil, *L. synagris* apresenta picos de desova em abril, maio e junho, diferentemente de *H. aurolineatum* que não possui picos (Lessa et al. 2004). Os lutjanídeos realizam agregações reprodutivas, sendo que na Bahia, foi registrada a época de desova de *L. synagris* entre os meses de agosto e abril, com pico reprodutivo nos meses de setembro,

novembro e fevereiro (Santana, 2015). Embora, parte das amostragens do ariacó no presente estudo, tenha sido realizada no período de desova registrado na Bahia, não foi identificado nenhum indivíduo maduro (fase III), isso significa que os peixes não estavam desenvolvidos fisiologicamente para desova, e que ambas as espécies não estão aptas para se reproduzirem nos meses amostrados.

A variação espacial na frequência dos estágios de maturação em *L. synagris* indica que o desenvolvimento gonadal dos peixes varia entre as populações de localidades distintas. Essas diferenças populacionais no ciclo reprodutivo apontam que embora pertença a mesma espécie, os períodos de desova estão variando entre as regiões. A maturação gonadal se completa quando as condições do ambiente são adequadas à fecundação e desenvolvimento da prole (Vazzoler 1996), portanto, as flutuações ambientais influenciam na variação da atividade reprodutiva entre populações de uma mesma espécie (Vicenti et al. 2012).

Ambas as espécies apresentaram predominância de peixes adultos. A fase adulta continuou sendo predominante nas populações de cada sítio amostral, exceto, *H. aurolineatum* em Madre de Deus, constituída em sua maioria por juvenis. Em uma mesma população pode apresentar mudança na dieta, no comportamento e no uso do habitat conforme a fase ontogenética. Os peixes *L. synagris* são carnívoros e generalistas- oportunistas, se alimentam de crustáceos, cefalópodes e peixes teleósteos, preferem áreas de recifes, plataforma ou talude continental, enquanto os juvenis consomem presas menores e habitam áreas estuarinas (Fernandes et al. 2021). *H. aurolineatum* é uma espécie de peixes recifais, alimentam-se de organismos epibentônicos, como poliquetas, crustáceos e equinodermos. Os juvenis se alimentam preferencialmente na coluna d'água, enquanto, os adultos forrageiam na areia e nas rochas (Darcy, 1983).

O número de machos e fêmeas de peixes da espécie *H. aurolineatum* tende a uma distribuição igualitária, com uma proporção sexual de 1:1, entretanto, na espécie *L. synagris* houve um desbalanço entre o número de indivíduos de cada sexo, com predominância de fêmeas sobre os machos. No litoral norte da Bahia (Santana, 2015), assim como em Recife (Silva-Júnior, 2009), machos prevaleceram no total da amostra, diferentemente dos resultados deste estudo e da população amostrada no Banco de Abrolhos, onde a proporção sexual foi de 1:1 (Freitas, 2009). Entretanto, nestes trabalhos observou-se um predomínio de fêmeas em tamanhos acima de 30 cm. A proporção sexual é importante para a caracterização da estrutura de uma espécie ou população (Vazzoler 1996). A expectativa é que a proporção sexual seja 1:1, de modo que não haja um desbalanço entre o número de indivíduo de cada sexo na população. Contudo, a razão sexual é influenciada pela mortalidade, crescimento,

comportamento, disponibilidade de alimento e condições ambientais (Oliveira et al. 2012). Dessa forma, distintas razões direcionam a proporção sexual em peixes, sendo difícil inferir um aspecto apenas como o principal no estabelecimento da proporção sexual.

4.3 Estrutura das populações quanto aos índices fisiológicos

O fator de condição (K) de *Lutjanus synagris* variou de 0,015 a 0,146 e de *H. aurolienatum* de 0,006 a 0,016, indicando que os peixes não estão em boa condição fisiológica ($K < 1$) (Famoofo & Abdul 2020). Esse fator geralmente é um indicador da disponibilidade de alimento em um habitat específico (Hasan et al. 2021) e de tolerância a distúrbios ambientais (Imorou et al. 2019). As populações de peixes em Itacaré apresentaram maior valor de K do que àqueles em áreas afetadas pelo óleo, isso indica que eles apresentam melhor condição. Peixes melhores condicionados são reflexos de maior oferta de recursos, e menos competidores e predadores em seus habitats (Batubara et al. 2019). É também um indicativo das reservas energéticas em seus tecidos, e, sendo assim, peixes com melhor condição tem maior taxa de crescimento e potencial reprodutivo e de sobrevivência do que outros em pior condição (Camara et al. 2011).

A diferença no fator de condição entre os estágios de maturação em *L. synagris* indica que os peixes que estão finalizando o ciclo reprodutivo (fase IV) apresentaram menor condição do que os indivíduos que estão iniciando o desenvolvimento gonadal (fase II). A redução do fator de condição está associada aos gastos energéticos decorrentes do processo reprodutivo. Normalmente, os peixes apresentam uma queda na condição corpórea após a desova (Snyder et al. 2019; Costa et al. 2022).

Os GLM mostraram que o fator de condição em *L. synagris* está positivamente relacionado com o comprimento total dos peixes. Essa relação é justificada pelo crescimento dos organismos, pois, geralmente os peixes maiores apresentam maiores reservas de energia, visto que o peso corporal aumenta à medida que os peixes crescem (Lloret et al. 2002). Contudo, o efeito do ambiente foi maior na condição corporal de *L. synagris* e *H. aurolineatum*. O efeito negativo mais intenso foi constatado em Tinharé-Boipeba, a região mais afetada pelo derrame de óleo. Salienta-se que na primeira espécie houve efeito negativo e significativo também de Madre de Deus no fator de condição (K), ambiente cronicamente perturbado pelas atividades petrolíferas.

Esse padrão reduzido no fator de condição foi observado também em *Lutjanus vivanus* associado aos contaminantes orgânicos oriundos de derrames de petróleo, combustão e atividades da indústria petrolífera (Carr 2020) e em 52 espécies de peixes (incluindo espécies

de *Lutjanus*) de um estuário com distúrbio antropogênico decorrente de efluentes industriais (Uttah et al. 2012). A redução no K também foi constatada em peixes *Rachycentron canadum* após 14 dias de exposição ao petróleo, indicando um esgotamento rápido da condição fisiológica (Rezende et al. 2016) e em *Lopholatilus chamaeleonticeps* após o derrame de óleo no Golfo do México associado ao alto custo energético para a desintoxicação de contaminantes (Snyder et al. 2019).

A redução na condição corporal também pode ser atribuída à escassez de alimento (Kumar et al. 2017), como foi constatado o efeito do óleo da Deepwater Horizon na diminuição no fator de condição na guilda trófica das garoupas, demonstrando que são incapazes de consumirem presas suficientes para suas necessidades em um ambiente oleado (Ainsworth et al. 2018). Como citado acima, o derramamento de óleo também pode afetar presas ou predadores das espécies, podendo levar a uma escassez de alimento. Além disso, o baixo fator de condição implica em condições ambientais desfavoráveis, incluindo a qualidade da água, habitat, biomarcador de efeitos de contaminantes e menor disponibilidade de presa (Snyder et al. 2019), tudo isso contribuindo para um empobrecimento dos aspectos fisiológicos.

O índice hepatossomático (IHS) variou significativamente entre os sexos em *L. synagris*, sendo as fêmeas com valores superiores aos machos. Esse padrão também foi observado em *Lutjanus campechanus* (Nicholson et al. 2023) e outras espécies marinhas, como *Mullus barbatus* e *Pagellus erythrinus* (Lloret et al. 2002) e *Boreogadus saida* (Bender et al. 2016), cujas fêmeas estavam melhor condicionadas. Destaca-se que as reservas energéticas são atributos importantes para as populações, pois influenciam no crescimento, sucesso reprodutivo e sobrevivência (Lloret et al. 2002).

A variação do IHS foi significativa entre os ambientes, sendo menor na população de *L. synagris* em Madre de Deus, localizada na BTS, uma região com histórico de contaminação química (Silva et al. 2016, Santana et al. 2017). Baixos valores no IHS também foram registrados em peixes da família Lutjanidae, *Pristipomoides aquilonaris*, com altos valores de contaminantes orgânicos (Carr 2020). O índice hepatossomático é um parâmetro importante para avaliar a saúde de peixes, pois reflete os efeitos fisiológicos resultantes de estresse ambiental causado pela indisponibilidade de alimento ou poluição (Mnemba et al. 2022). A redução de índices somáticos em peixes, como o IHS, é um indicativo de deficiência nas reservas de energias desses organismos (Bender et al. 2016). Portanto, baixos valores refletem o esgotamento das reservas energéticas, como o glicogênio e lipídeo do fígado (Silva 2020,

Faria 2022). Esse resultado corrobora com os baixos valores do fator de condição nos peixes de áreas afetadas pelo petróleo.

Sugere-se que esse padrão possa estar associado a menor disponibilidade de alimentos nesses ambientes, visto que os distúrbios antropogênicos podem afetar a estrutura das cadeias alimentares. Após o derramamento de óleo da Deepwater Horizon (DWH), houve mudanças na dieta e na posição trófica de *Lutjanus campechanus* sugerindo mudanças na abundância de suas presas (Tarnecki & Patterson 2015). Após esse mesmo derrame, foram observadas mudanças na estrutura de comunidades de peixes recifais, com declínio na riqueza de espécies e na densidade de guildas tróficas, sugerindo efeitos indiretos do óleo na cadeia alimentar (Lewis et al. 2020). O petróleo favoreceu as taxas de mortalidade de peixes em função da limitação de recursos (Ainsworth et al. 2018). Desta forma, os distúrbios ambientais provocam estresse fisiológico, podendo interferir no metabolismo e crescimento dos organismos (Battisti et al. 2019).

5. CONCLUSÃO

As populações de *L. synagris* apresentaram o mesmo tipo de crescimento, no entanto, as populações de *H. aurolineatum* em cada ambiente apresentaram diferentes padrões. Houve variação espacial na frequência dos estágios de maturação do ariacó, indicando que o desenvolvimento gonadal dos peixes variou entre as populações de localidades distintas. Entretanto, não houve associação entre a maturação e o ambiente em *H. aurolineatum*. Nessa espécie, há uma tendência de distribuição igualitária de fêmeas e machos, diferente de *L. synagris* que houve um desbalanço na razão sexual. Contudo, distintas razões direcionam a proporção sexual em peixes, dificultando realizar maiores inferências neste aspecto.

Os menores valores biométricos de *L. synagris* foram observados em Tinharé-Boipeba (área mais afetada pelo derrame de óleo) e de *H. aurolineatum*, em Madre de Deus (área afetada cronicamente). O ambiente foi a variável preditora com maior efeito na condição corporal de ambas as espécies, sendo o efeito negativo mais intenso na região mais afetada pelo derrame de óleo. O índice hepatossomático teve influência ambiental apenas no ariacó, sendo menor na região cronicamente afetada.

Embora populações de áreas distintas possam apresentar, naturalmente, variações em suas estruturas populacionais, os resultados indicam que o distúrbio do óleo pode estar influenciando nessas mudanças, visto que as maiores alterações foram registradas em áreas mais afetadas pelo óleo, seja cronicamente em Madre de Deus, ou pelo acidente de 2019 em Tinharé-Boipeba. Considerando que aspectos reprodutivos de peixes podem contribuir para a

avaliação da qualidade do ambiente, indicando condições negativas e sugerindo ações para conservação de espécies, estes resultados podem representar um importante subsídio para o entendimento dos processos que afetam populações de peixes em casos de contaminação por óleo.

AGRADECIMENTOS

Esse estudo é parte da dissertação de mestrado desenvolvida no Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Evolução (UEFS) com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Agradecemos ao Projeto “Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) em Ambientes Marinhos Tropicais – AmbTropic – fase II” pela obtenção dos peixes analisados nesse estudo e ao Professor George Olavo por disponibilizar os dados dos desembarques pesqueiros.

ORCID

Amanda da Silva Souza [0000-0001-7431-6874](https://orcid.org/0000-0001-7431-6874)

Alexandre Clistenes de Alcântara Santos [0000-0003-3869-0265](https://orcid.org/0000-0003-3869-0265)

Natália de Souza Silva [0000-0003-3156-3343](https://orcid.org/0000-0003-3156-3343)

Taise Bomfim de Jesus [0000-0001-5238-9554](https://orcid.org/0000-0001-5238-9554)

REFERÊNCIAS

- Ainsworth CH, Paris CB, Perlin N, Dornberger LN, Patterson WF, Chancellor E, Murawski S, Hollander D, Daly K, Romero IC, Coleman F, Perryman H (2018) Impacts of the Deepwater Horizon oil spill evaluated using an end-to-end ecosystem model. *PLoS One* 13:1–21.
- Allen GR (1985) Um catálogo anotado e ilustrado das espécies de lutjanídeos conhecidas até o momento. *Peixe* FAO 125:208.
- Arukwe A, Goksøyr A (2012) Xenobiotics, xenoestrogens and reproduction disturbances in fish. *Sarsia* 83:225–241.
- Batubara AS, Muchlisin ZA, Efizon D, Elvyra R, Irham M (2019) Length-weight relationships and condition factors of the Naleh fish, *Barbonymus gonionotus* (Pisces, Cyprinidae) harvested from Nagan Raya waters, Indonesia. *Vestn Zool* 53:75–82.
- Begon M., Townsend CR., Harper JL (2007) *Ecologia de indivíduos a ecossistemas*, 4^a. Artmed (ed) São Paulo.
- Bender ML, Frantzen M, Vieweg I, Falk-Petersen IB, Johnsen HK, Rudolfson G, Tollefsen KE, Dubourg P, Nahrgang J (2016) Effects of chronic dietary petroleum exposure on reproductive development in polar cod (*Boreogadus saida*). *AquatToxicol* 180:196–208.
- Bravo E, Eslava N, González L (2009) Crecimiento y mortalidad natural del pez *Haemulon aurolineatum* (Teleostei: Haemulidae) del suroeste de la isla de Margarita, Venezuela. *Rev Biol Trop* 57:699–706.

- Brown-Peterson NJ, Wyanski DM, Saborido-Rey F, Macewicz BJ, Lowerre-Barbieri SK (2011) A standardized terminology for describing reproductive development in fishes. *Mar Coast Fish* 3:52–70.
- Camara EM, Caramaschi ÉP, Petry AC (2011) Fator de condição: Bases conceituais, aplicações e perspectivas de uso em pesquisas ecológicas com peixes. *Oecologia Aust* 15:249–274.
- Caramaschi ÉP, Brito MFG (2021) Reprodução de peixes de riacho: estado da arte, métodos e perspectivas. *Oecologia Aust* 25:323–343.
- Carr BE (2020) Polychlorinated Biphenyls , Organochlorine Pesticides , and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Snapper (Family Lutjanidae) from Cuba and the Wider Gulf of Mexico. University of South Florida
- Cavalcante LFM, Oliveira MR, Chellappa S (2012) Aspectos Reprodutivos do Ariacó, *Lutjanus synagris* nas Águas Costeiras do Rio Grande do Norte. *Biota Amaz* 2:45–50.
- Çiçek E, Seçer B, Sungur S, Öztürk S, Bahçeci H (2022) Length-weight relationships and condition factors of 28 fish species belonging to Leuciscidae (Cypriniformes) from Turkey. *J Appl Ichthyol* 38:364–367.
- De Andrade JB, Coutinho R (2022). Oil spill on the Brazilian coast. *An. Acad. Bras. Cienc*, 94: 1-4.
- Euzebio CS, Rangel GDS, Marques RC (2019) Derramamento de Petróleo e seus impactos no ambiente e na saúde humana. *Rev Bras Ciências Ambient* 1:79–98.
- Famoofo OO, Abdul WO (2020) Biometry, condition factors and length-weight relationships of sixteen fish species in Iwopin fresh-water ecotype of Lekki Lagoon, Ogun State, Southwest Nigeria. *Heliyon* 6:1–8.
- Faria F de S (2022) Restrição Alimentar e Realimentação na Tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*): efeitos sobre o tecido hepático, parâmetros fisiológicos e bioquímicos do sangue. Universidade Federal de Minas Gerais.
- Fernandes JFF, Freitas J, Nunes YBS, Lobato RS, Figueiredo MB (2021) Feeding habits of *Lutjanus synagris* (Teleostei: Lutjanidae) in the Amazon Coast of the Northeast Region of Brazil. *Bol do Inst Pesca* 46:1–12.
- Franco-Fuentes E, Moity N, Ramírez-González J, Andrade-Vera S, González-Weller D, Hardisson A, Paz S, Rubio C, Gutiérrez Á (2021) Metal and metalloids concentration in Galapagos fish liver and gonad tissues. *Mar Pollut Bull* 173:1–10.
- Freitas MO (2009) Pesca artesanal e biologia reprodutiva do ariacó *Lutjanus synagris* (Lutjanidae) no Banco dos Abrolhos. Universidade Estadual de Santa Cruz.
- Gomiero LM, Villares Junior GA, Braga FM de S (2010) Relação peso-comprimento e fator de condição de *Oligosarcus hepsetus* (Cuvier, 1829) no Parque Estadual da Serra do Mar - Núcleo Santa Virgínia, Mata Atlântica, estado de São Paulo, Brasil. *Biota Neotrop* 10:101–105.
- Hansen BH, Salaberria I, Read KE, Wold PA, Hammer KM, Olsen AJ, Altin D, Øverjordet IB, Nordtug T, Bardal T, Kjørsvik E (2019) Developmental effects in fish embryos exposed to oil dispersions – The impact of crude oil micro-droplets. *Mar Environ Res* 150:1–12.
- Hasan MR, Mamun A Al, Hossain MY (2021) Biometric indices of eleven mangrove fish species from southwest Bangladesh. *Egypt J Aquat Res* 47:207–213.
- Ibemenuga KN (2013) Impacts of crude oil on freshwater fish fauna, its control and management measures. *Anim Res Int* 10:1799–1804.
- Imorou RS, Adite A, Sossoukpe E, Abou Y (2019) Length-weight models and condition factors of fishes from Okpara Stream, Oueme River, Northern-Benin. *Int J For Anim Fish Res* 3:65–80.

- Jiang X, Wang J, Pan B, Li D, Wang Y, Liu X (2022) Assessment of heavy metal accumulation in freshwater fish of Dongting Lake, China: Effects of feeding habits, habitat preferences and body size. *J Environ Sci* 112:355–365.
- Kumar N, Krishnani KK, Meena KK, Gupta SK, Singh NP (2017) Oxidative and cellular metabolic stress of *Oreochromis mossambicus* as biomarkers indicators of trace element contaminants. *Chemosphere* 171:265–274.
- Lawrence A, Hemingway L (2003) Effects of pollution on fish: molecular effects and population responses. 1^a ed. Blackwell Science, 368 p.
- Lessa RP, Nóbrega MF, Bezerra Junior JL (2004) Dinâmica de populações e avaliação dos estoques dos recursos pesqueiros da região nordeste. Vol 3 Programa REVIZEE, Recife.
- Lewis JP, Tarnecki JH, Garner SB, Chagaris DD, Patterson WF (2020) Changes in Reef Fish Community Structure Following the Deepwater Horizon Oil Spill. *Sci Rep* 10:1–13.
- Lira RD (2019) Dinâmica populacional do peixe ariocó, *Lutjanus synagris* (Linnaeus, 1758) (Actinopterygii: Perciformes) nas águas costeiras do Rio Grande do Norte, Brasil.
- Lloret J, Gil de Sola L, Souplet A, Galzin R (2002) Effects of large-scale habitat variability on condition of demersal exploited fish in the north-western Mediterranean. *ICES J Mar Sci* 59:1215–1227.
- Mnemba S, Bakari S, Mwevura H (2022) Weight-length relationships, condition factor and hepatosomatic index of goby fish *Acentrogobius nebulosus* and *Asterropteryx semipunctata* in coastal ecosystems of Zanzibar. *Int J Acad Multidiscip Res* 6:204–211.
- Nascimento WS, Yamamoto ME, Chellappa S (2012) Proporção sexual e relação peso-comprimento do peixe anual *Hypsoblebias antenori* (Cyprinodontiformes: Rivulidae) de poças temporárias da região semiárida do Brasil. *Biota Amaz* 2:37–44.
- Nicholson TJ, Pulster EL, Murawski SA, Judkins HL (2023) A comparison of PAH exposure in red snapper (*Lutjanus campechanus*) around natural and artificial reefs in the northwestern Gulf of Mexico. *Continental Shelf Research* 258:1-9.
- Oliveira MR, Costa EFS, Araújo AS, Pessoa EKR, Chellappa S (2012) Sex ratio and length-weight relationship for five marine fish species from Brazil. *J Mar Biol Oceanogr* 01:1–4.
- Ondei L de S, Teresa FB, Garcia DP, Felício AA, da Silva DGH, de Almeida EA (2020) Fish biomarker responses to perturbation by drought in streams. *Neotrop Ichthyol* 18:1–15.
- Oyetibo GO, Ige OO, Obinani PK, Amund OO (2021) Ecological risk potentials of petroleum hydrocarbons and heavy metals shape the bacterial communities of marine hydrosphere at Atlantic Ocean, Atlas Cove, Nigeria. *J Environ Manage* 289:1–9.
- Osri M, Shibatta OA, Silva-Souza ÂT (2002) Caracterização biológica de populações de peixes do rio Tibagi, localidade de Sertãoópolis. In: *A Bacia do Rio Tibagi*. Medri ME, Bianchini E, Shibatta OA, Pimenta JA (eds) Londrina, p 601
- Peñuela MM (2020) Ajustes fisiológicos de *Astyanax altiparanae* (Teleostei: Characiformes: Characidae) expostos a fármacos de preocupação emergente. Universidade de São Paulo
- Peterson CH, Rice SD, Short JW, Esler D, Bodkin JL, Ballachey BE, Irons DB (2003) Long-Term Ecosystem Response to the Exxon Valdez Oil Spill. *Science* (80-) 302:2082–2086.

- Prado PS (2010) Avaliação da atividade reprodutiva e de biomarcadores de impacto ambiental no lambari *Astyanax fasciatus* do reservatório de Furnas, Rio Grande, Minas Gerais. Universidade Federal de Minas Gerais
- Rezende KF, Silva Neto GM, Pinto JM, Salvo LM, Severino D, Moraes JCT de, Silva JRMC da (2016) Hepatic Parameters of Marine Fish *Rachycentron canadum* (Linnaeus, 1766) Exposed to Sublethal Concentrations of Water-Soluble Fraction of Petroleum. *J Mar Biol Oceanogr* 5:1–6.
- Robins C, Ray G (1986) Um guia de campo para os peixes da costa atlântica da América do Norte. Company HM (ed) Boston, EUA.
- Röpke CP, Pires TH, Winemiller KO, Fex Wolf D, Deus CP, Amadio S (2019) Reproductive allocation by Amazon fishes in relation to feeding strategy and hydrology. *Hydrobiologia*, 826(1):291–305.
- Santana CO, Jesus TB, Aguiar WM, Jesus Sant’anna Franca-Rocha W, Soares CAC (2017) Assessment of health risk related to the ingestion of trace metals through fish consumption in Todos os Santos Bay. *Environ Monit Assess* 189:1–7.
- Santana I De (2015) Ecologia reprodutiva de Lutjanidae no litoral norte da Bahia, Brasil: contribuições ao manejo sustentável da pesca artesanal. Universidade de Vigo.
- Short JW (2017) Advances in understanding the fate and effects of oil from accidental spills in the United States beginning with the Exxon Valdez. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 73:5-11.
- Silva E, Costa FN, Souza TL, Viana ZCV, Souza AS, Korn MGA, Ferreira SLC (2016) Assessment of trace elements in tissues of fish species: multivariate study and safety evaluation. *J Braz Chem Soc* 27:2234–2245.
- Silva LA (2020) Biomarcadores de exposição e efeito indicam alterações na saúde do peixe *Aequidens pallidus* (Cichliformes, Cichlidae) após exposição in situ em igarapés urbanos. Instituto Nacional De Pesquisas Da Amazônia – INPA.
- Silva LSC, Picanço J de L, Calil JGS (2020) O grande desastre esquecido: análise preliminar do derramamento de óleo na costa brasileira (agosto/2019 - março/2020) e seus impactos no litoral da Bahia. *Rev da UFMG* 27:54–79.
- Silva Júnior LA (2009) Pesca com covo e reprodução do Ariocó *Lutjanus synagris* (Perciformes: Lutjanidae) na costa de Pernambuco. Universidade Federal de Pernambuco.
- Snyder SM, Pulster EL, Murawski SA (2019) Associations Between Chronic Exposure to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Health Indices in Gulf of Mexico Tilefish (*Lopholatilus chamaeleonticeps*) Post Deepwater Horizon. *Environ Toxicol Chem* 38:2659–2671.
- Soares MO, Rabelo EF (2023) Severe ecological impacts caused by one of the worst orphan oil spills worldwide. *Mar Environ Res* 187:1–8.
- Sousa AFR, Santos NB, Carvalho Neta RNF, Almeida Z da S (2017) Aspectos reprodutivos do peixe *Lutjanus synagris* (Perciformes, Lutjanidae) capturado na costa nordeste do Brasil. *Rev Bras Eng Pesca* 10:106–120.
- Souza CS, Mafalda Junior PO, Kikuchi RKP, Dominguez JML (2022) Assessment of the Brazilian coast oil spill impact in the fish eggs and larvae development from the tropical continental shelf. *Regional Studies in Marine Science*, 56:102635.
- Tairova Z, Frantzen M, Mosbech A, Arukwe A, Gustavson K (2019) Effects of water accommodated fraction of physically and chemically dispersed heavy fuel oil on beach spawning capelin (*Mallotus villosus*). *Mar Environ Res* 147:62–71.
- Tarnecki JH, Patterson WF (2015) Changes in Red Snapper Diet and Trophic Ecology Following the Deepwater Horizon Oil Spill. *Mar Coast Fish* 7:135–147.

- Taslina K, Al-Emran M, Rahman MS, Hasan J, Ferdous Z, Rohani MF, Shahjahan M (2022) Impacts of heavy metals on early development, growth and reproduction of fish – A review. *Toxicol Reports* 9:858–868.
- Trindade-Santos I, Freire K de MF (2015) Analysis of reproductive patterns of fishes from three Large Marine Ecosystems. *Front Mar Sci* 2:1–10.
- Uttah C, Uttah E, Ayanda I (2012) Environmental quality assessment of anthropogenically impacted estuary using fish genera composition, tissue analysis and condition factor. *Journal of Science and Technology* 13:537-542.
- Vazzoler AEA de M (1996) *Biologia da reprodução de peixes teleósteos: teoria e prática*. EDUEM (ed) Universidade Estadual de Maringá, São Paulo.

Bioacumulação de elementos químicos em peixes de áreas afetadas por óleo no litoral da Bahia, Brasil

Amanda da Silva Souza^a, Taise Bomfim de Jesus^b, Alexandre Clístenes de Alcântara Santos^a

^aUniversidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Evolução (PPGECOEVOL), Avenida Transnordestina, s/n - Novo Horizonte, 44036-900, Feira de Santana, Bahia, Brasil

^b Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente (PPGM), Avenida Transnordestina, s/n - Novo Horizonte, 44036-900, Feira de Santana, Bahia, Brasil

Resumo

Em 2019, o litoral brasileiro foi afetado com o maior derramamento de óleo da história. Nós avaliamos os níveis de elementos químicos em peixes *Lutjanus synagris* e *Haemulon aurolienatum* de Itacaré (área menos afetada), Tinharé-Boipeba (área mais afetada) e Madre de Deus (área afetada cronicamente). O nível dos metais diferiu entre as espécies, tecidos, fases do ciclo de vida, estágios de maturação e entre as localidades amostradas, indicando a influência dos aspectos biológicos e ambientais na bioacumulação. Apenas os peixes em Madre de Deus apresentaram contaminação por chumbo, enquanto as concentrações de arsênio nas três áreas superaram o valor máximo aceitável pela Anvisa. Sugere-se que o derramamento de óleo pode ter impactado diferentemente as espécies, trazendo impactos também aos peixes de áreas menos afetadas. Contudo, as concentrações de metais nos peixes em Madre de Deus se destacaram, ao comparar com as populações das outras áreas estudadas.

Palavras-chave: contaminação, *Haemulon aurolineatum*, *Lutjanus synagris*, metais, petróleo.

Introdução

Os distúrbios antropogênicos alteram as relações entre os fatores bióticos e abióticos (Beever et al., 2019), como a entrada de poluentes orgânicos e inorgânicos nos ecossistemas aquáticos que afetam os organismos e as cadeias tróficas (Thanigaivel et al., 2023). Em áreas afetadas por petróleo há o enriquecimento de metais no ambiente, o que contribui para a bioacumulação nos seres vivos (Adebiyi and Ayeni 2022, Oliveira, 2022). Esse processo ocorre quando a entrada dos elementos químicos no organismo excede a eliminação, o qual é influenciado pelo próprio metabolismo, e por fatores ambientais, como a concentração, biodisponibilidade e persistência dos metais no habitat (Pan et al., 2022).

Os metais são categorizados em dois grupos: elementos essenciais, aqueles que desempenham função no metabolismo dos organismos, e os elementos não-essenciais/tóxicos,

que não possuem função biológica e apresentam toxicidade em pequenas concentrações, contudo, os metais essenciais em altas concentrações também apresentam efeitos tóxicos (Loureiro and Hepp, 2020). Esses elementos químicos ocorrem naturalmente no ambiente, através da deposição atmosférica e intemperismo (Förstner and Wittmann, 1981), todavia, atividades antrópicas têm aumentado as suas concentrações nos ecossistemas aquáticos (Juśkiewicz and Gierszewski, 2022; Shi et al., 2019), como, por exemplo, a mineração, drenagem agrícola, descarga de esgotos e efluentes industriais, derramamento de petróleo e resíduos químicos (Sheikhzadeh and Hamidian, 2021).

Em 2019, o litoral brasileiro foi afetado pelo maior derramamento de óleo da história do país e atingiu 4.332 km da costa em 11 estados do nordeste e sudeste (Pena et al. 2020). Na Bahia, as primeiras manchas de óleo foram identificadas no mês de outubro (Ibama 2020). Os derramamentos de petróleo são fontes de entrada de vários contaminantes no ambiente marinho, o qual é constituído por substâncias tóxicas, como hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HPA), compostos orgânicos voláteis, sulfeto de hidrogênio e metais (Oliveira, 2022).

Os peixes são sensíveis às alterações ambientais, e possuem capacidade de metabolizar, desintoxicar e acumular os metais em diferentes tecidos, em função da sua fisiologia (Shahjahan et al., 2022). Esses elementos podem afetar o crescimento (Jiang et al., 2022), reprodução (Taslina et al., 2022) e índices de condição dos peixes (Javed and Usmani, 2017), os quais são bioacumulados pela via respiratória, dérmica ou digestória através da dieta e/ou contato direto com a água (Lemus, 2014). Sendo assim, as condições ambientais, o uso do habitat e fatores metabólicos dos organismos podem influenciar na capacidade acumulativa de metais (Franco-Fuentes et al., 2021), assim como a idade, fase de desenvolvimento (Eyankware and Obasi, 2021), sexo (Bastos et al., 2016; Lozano-Bilbao et al., 2020) e o tamanho corporal (Jiang et al., 2022).

A Bahia foi o estado com maior registro da fauna oleada após o distúrbio ambiental do óleo no Brasil (Ibama 2020), nesse sentido, estudar a bioacumulação de metais em peixes do litoral baiano em diferentes áreas afetadas pelo óleo permite avaliar a biodisponibilidade de metais nos ecossistemas marinhos e os impactos nas populações. Itacaré, apesar de alguns registros de óleo, foi considerada a área pouco afetada pelo distúrbio ambiental, em função do menor registro de ocorrência de óleo (1 a 10). O arquipélago de Tinharé-Boipeba, em Cairu, foi considerado mais afetado pelo derrame de óleo, pois foram registradas 21 a 30 ocorrências de óleo no município (Silva et al., 2020). E, a ilha Madre de Deus na Baía de Todos os Santos

(BTS) considerou-se afetada cronicamente, devido ao histórico de contaminação química pelas atividades petrolíferas nessa região (Hatje et al., 2009).

Sendo assim, nossas hipóteses são: 1) os peixes de ambientes com diferente intensidade de contaminação por óleo apresentam padrões distintos de bioacumulação dos elementos químicos e 2) os elementos químicos estão relacionados com os aspectos populacionais dos peixes. Nesse sentido, os objetivos desse estudo foram: avaliar os níveis elementares nos tecidos muscular e hepático das espécies de peixes *Lutjanus synagris* (ariacó) e *Haemulon aurolineatum* (quatinga), pertencentes as famílias Lutjanidae e Haemulidae, respectivamente, das localidades de Itacaré, Tinharé-Boipeba e Madre de Deus, e avaliar as concentrações dos elementos químicos em função dos aspectos populacionais.

Materiais e métodos

Área de estudo

A Bahia está localizada no nordeste do Brasil, e apresenta a faixa litorânea mais extensa do país, margeada pelo Oceano Atlântico. As áreas de coleta dos peixes no litoral baiano compreendem Madre de Deus, Tinharé – Boipeba e Itacaré (Figura 1). Madre de Deus fica situada na porção norte da Baía de Todos os Santos (BTS), o arquipélago de Tinharé e Boipeba está localizado no litoral sul da Bahia, no município de Cairu, e Itacaré, situa-se no litoral sul da Bahia, junto à foz do rio de Contas.

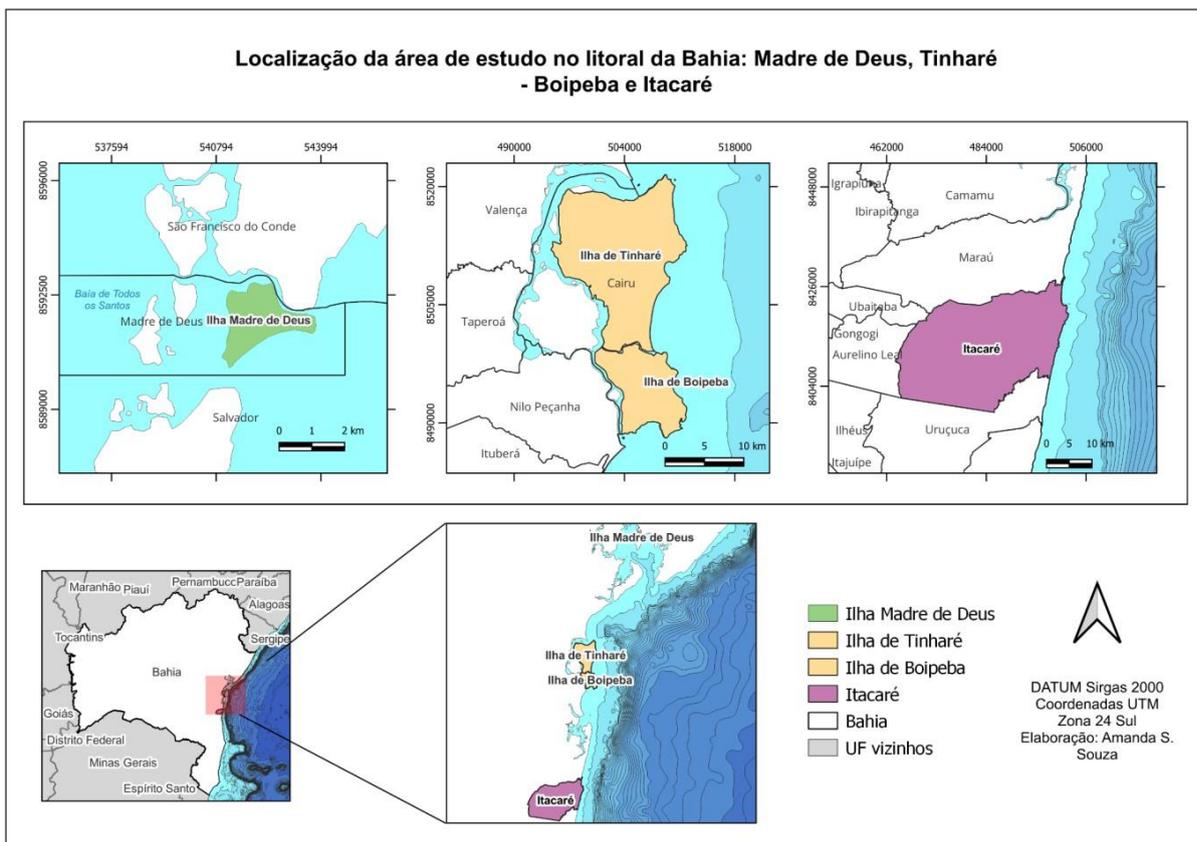


Figura 1. Localização da área de estudo no litoral da Bahia: Madre de Deus, Tinharé-Boipeba e Itacaré.

Coleta de dados

Os peixes estudados fazem parte do banco de dados do laboratório de Ictiologia e Pesca (LIPE) da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS). As espécies do estudo são *Lutjanus synagris* (n = 87) e *Haemulon aurolineatum* (n = 66). Foram obtidas por meio de pescadores de cada localidade (Itacaré, Tinharé-Boipeba e Madre de Deus), após a devida confirmação dos locais de captura, nos meses de fevereiro, abril, junho e julho de 2021.

Após a dissecação dos peixes no LIPE, foram coletados o fígado e músculo. Realizou-se a lavagem química das vidrarias e materiais para assegurar a ausência de retenção de metais nesses itens (Couto, 2011). A digestão química dos tecidos (n=596) dos peixes foi realizada no Laboratório de Química e no Laboratório de Geoquímica e Catálise Ambiental (UEFS). Foi pesado 1 g de tecido em béquer e adicionados 2 ml HClO₄ e 4 ml HNO₃, submetido à temperatura de 60 °C na chapa aquecedora para decomposição dos compostos orgânicos das amostras (Santana et al., 2017).

A quantificação do arsênio (As), chumbo (Pb), cádmio (Cd), cobre (Cu), bário (Ba), cromo (Cr), zinco (Zn), manganês (Mn), ferro (Fe), cobalto (Co), níquel (Ni) e vanádio (V) foi realizada através do método de espectrofotometria de emissão óptica em plasma induzido (ICP-OES) model 700 series (Agilent) no Laboratório de Estudos de Petróleo (LEPETRO) da

Universidade Federal da Bahia (UFBA). Os limites de detecção dos elementos calculados foram: As (0,00005 mg/kg), Pb (0,0002 mg/kg), Ba (0,0000001 mg/kg), Cr (0,00002 mg/kg), Mn (0,000001 mg/kg), Zn (0,00006 mg/kg) e Fe (0,00005 mg/kg).

Análise de dados

A concentração dos elementos químicos [E] foi determinada a partir da fórmula: $E = CxV/m$, onde C é a concentração obtida pelo espectrofotômetro em mg/L, V é o volume final da solução após a digestão e m é a massa do tecido. As amostras que foram diluídas considerou-se o fator de diluição no cálculo da concentração final.

Foi calculado o fator de bioconcentração (FBC) do fígado em relação ao músculo de *L. synagris* e *H. aurolineatum* conforme a fórmula: $FBC=C1/C2$, onde $C1$ é a concentração do elemento químico no fígado e $C2$ é a concentração do elemento químico no músculo (Repula et al., 2012).

Os dados foram analisados utilizando o software R (versão 4.2.1, 2022). Foi realizado o teste não paramétrico de Mann-Whitney para avaliar se os níveis dos elementos químicos diferiram entre as duas espécies, entre os diferentes tecidos, entre juvenis e adultos, e entre machos e fêmeas. Foi aplicado o teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis e teste post-hoc de Dunn para avaliar a variação na concentração química entre as localidades amostradas (Itacaré, Madre de Deus e Tinharé-Boipeba) e entre os diferentes estágios de maturação gonadal utilizando o pacote *rstatix*.

Foi realizada a análise de correlação entre as concentrações de cada elemento químico e o comprimento total, fator de condição e índice hepatossomático das espécies (separadamente) através do teste de correlação de Spearman. Para avaliar as tendências das variáveis biológicas e os níveis dos elementos químicos nas populações de peixes estudadas foi realizada uma análise de componentes principais (PCA) no software Past (versão 4.03, 2020). Previamente a essa análise foi feita a padronização dos dados, para que não houvesse interferência da escala das variáveis originais.

Resultados e discussão

Concentração dos elementos em função das espécies e tecidos

Esse estudo apresenta a primeira avaliação da bioacumulação de elementos químicos em *H. aurolineatum* (quatinga), na Bahia. Embora a espécie, *L. synagris* (ariacó) seja amplamente estudada, a maioria desses estudos avalia apenas o tecido muscular com ênfase nos metais tóxicos (Souza-Araujo, 2022, Silva et al., 2019, Viana, 2012). Portanto, este é o

primeiro estudo na Bahia sobre essas espécies que avalia os elementos químicos de forma mais abrangente, e com a perspectiva ecológica.

As tabelas 1 e 2 apresentam as concentrações dos elementos químicos detectados nos tecidos das espécies estudadas. Os níveis dos elementos no músculo não variaram entre as espécies ($p>0,05$), enquanto no fígado, as concentrações de Cu, Fe, Ba e Cr diferiram significativamente ($p<0,003$), sendo que o ariacó apresentou maiores concentrações de Cu e Fe e a quatinga apresentou maiores níveis de Ba e Cr.

Tabela 1. Média e desvio padrão da concentração dos elementos químicos (mg/kg) no músculo de peixes das espécies *Lutjanus synagris* e *Haemulon aurolineatum* do litoral da Bahia, Brasil

Espécie	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	V	Zn
<i>Lutjanus synagris</i>	<u>1,53</u>	<u>0,3</u>	<u><LD</u>	<u>0,47</u>	<u>0,61</u>	<u>2,02</u>	<u>0,17</u>	<u>0,4</u>	<u>0,29</u>	<u><LD</u>	<u>2,31</u>
	0,88	0,22		0,46	0,46	1,8	0,09	0,33	0,57		0,96
<i>Haemulon aurolineatum</i>	<u>1,63</u>	<u>0,28</u>	<u><LD</u>	<u>0,32</u>	<u><LD</u>	<u>1,7</u>	<u>0,20</u>	<u><LD</u>	<u>0,21</u>	<u><LD</u>	<u>2,75</u>
	1,67	0,19		0,04		1,09	0,05		0,2		1,15

Tabela 2. Média e desvio padrão da concentração dos elementos químicos (mg/kg) no fígado de peixes das espécies *Lutjanus synagris* e *Haemulon aurolineatum* do litoral da Bahia, Brasil

Espécie	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	V	Zn
<i>Lutjanus synagris</i>	<u>5,16</u>	<u>1,76</u>	<u>0,48</u>	<u>2,62</u>	<u>3,29</u>	<u>277,47</u>	<u>0,73</u>	<u><LD</u>	<u>1,68</u>	<u>0,32</u>	<u>43,69</u>
	6,05	2,82	0,81	5,52	2,73	158,46	0,87		1,96	0,35	18,19
<i>Haemulon aurolineatum</i>	<u>10,34</u>	<u>2,76</u>	<u><LD</u>	<u>4,02</u>	<u>1,65</u>	<u>108,96</u>	<u>5,27</u>	<u><LD</u>	<u>2,47</u>	<u>0,55</u>	<u>44,43</u>
	15,17	3,29		7,23	1,89	73,26	12,0		2,56		27,77

Esse resultado indica que aspectos da biologia e ecologia da espécie influenciam na capacidade de acumulação dos elementos nos peixes. Outros estudos também identificaram essa relação, atribuída às diferenças no uso do hábitat (Franco-Fuentes et al., 2021; Qadir and Malik, 2011), na dieta (Pan et al., 2022; Jiang et al., 2022), na absorção e desintoxicação (Lemus et al., 2014), e na sensibilidade aos elementos biodisponíveis (Bonsignore et al., 2019).

As espécies apresentam diferenças no uso do hábitat. Os lutjanídeos (ariacó) realizam migrações ontogenéticas, dos berçários costeiros para recifes. Ocorrem em estuários, fundos rochosos, ervas marinhas, recifes costeiros, de plataforma e oceânicos (McMahon et al.,

2012), refletindo associações de habitats mais generalistas quando comparado com a quatinga, que ocorre exclusivamente em áreas recifais (na fase adulta) (Reis-Filho et al., 2019). A diversidade de habitat e a maior mobilidade de *L. synagris* pode ter desencadeado uma maior exposição ao óleo, visto que o derramamento afetou diferentes habitats costeiros marinhos, destacando os estuários, manguezais, ervas marinhas, praias e recifes de corais (Magris and Tommaso, 2020).

As espécies são agrupadas em categorias tróficas distintas, *L. synagris* é carnívora, generalista-oportunista que se alimenta de crustáceos, cefalópodes e peixes (Fernandes et al. 2021), enquanto os peixes *H. aurolineatum* são invertívoros (Rangel et al., 2007), consomem invertebrados bentônicos, sendo que os juvenis se alimentam principalmente de zooplâncton (Darcy, 1983). Após o derrame de óleo foi detectada a presença de óleo em peixes, moluscos, crustáceos (Araújo et al., 2020), poliquetas e organismos zooplanctônicos (Soares and Rabelo, 2023) e mudanças na estrutura de comunidades bentônicas (Soares et al., 2022), podendo este fato ter impactado a disponibilidade e a qualidade das presas para as espécies de peixes estudadas.

As diferenças nos aspectos ecológicos e na condição fisiológica entre as espécies de peixes podem ser fatores determinantes para a variação na bioacumulação dos elementos químicos (Varol et al., 2022), pois espécies distintas podem apresentar diferentes capacidades de absorção e desintoxicação. A absorção ocorre principalmente através das brânquias (respiração) e/ou através do intestino (alimentação), e a desintoxicação é um processo que está atrelado à tolerância da espécie a um determinado elemento químico, inativação e eliminação do organismo (Fortes et al., 2023).

A tabela 3 apresenta a tendência de concentração dos elementos químicos nos tecidos dos peixes avaliados. Em ambas as espécies, os elementos mais abundantes foram o Fe e Zn, os quais consistem em metais essenciais para os seres vivos. Essa prevalência também foi constatada em *Lutjanus campechanus*, *Lutjanus griseus* (Nasri, 2018) e outras espécies marinhas (Yang et al., 2021).

Tabela 3. Tendência de concentração dos elementos químicos (mg/kg) em tecidos de peixes de *Lutjanus synagris* e *Haemulon aurolienatum* em função do ambiente.

Ambiente	<i>Lutjanus synagris</i>		<i>Haemulon aurolineatum</i>	
	Músculo	Fígado	Músculo	Fígado
Itacaré	As>Zn>Fe>Cr>Pb>	Fe>Zn>Cu>As>Cr>	Zn>Fe>As>Cr>Ba>	Fe>Zn>As>Mn>Ba>

	Ba>Mn	Cd>Mn>Ba>V	Mn>Pb	Cu>Cr>V>Pb
Madre de Deus	Zn>Fe>As>Cr>Cu> Ni>Ba>Pb>Mn	Fe>Zn>As>Cr>Cu> Ba>Pb>Mn>V>Cd	Zn>Fe>As>Pb>Ba> Mn	Fe>Zn>As>Mn>Cr> Ba>Pb
Tinharé-Boipeba	Zn>Fe>As>Cr>Ba> Ni=Pb>Mn	Fe>Zn>Cr>As>Cu> Ba>Pb>Mn>Cd	Zn>As>Fe>Cr>Ba	Fe>Zn>As>Ba>Cu> Cr>Pb>Mn

O Fe está presente em todas as células do corpo dos vertebrados, fundamental para processos bioquímicos, como ligação e transporte de oxigênio, transferência de elétrons e regulação gênica. O Zn desempenha três funções específicas nos organismos: papel catalítico de mais de 300 enzimas, estabiliza a estrutura das metaloenzimas e função reguladora, ativando ou inibindo fatores de transcrição que regulam a expressão gênica (Lall and Kaushik, 2021).

Quando comparada às concentrações dos elementos químicos detectáveis, em ambos os tecidos, nas diferentes espécies, foram obtidas diferenças significativas: $p < 0,01$ em *L. synagris* e $p < 0,02$ em *H. aurolineatum*, sendo o fígado, o tecido que apresentou maiores concentrações dos elementos analisados.

O fator de bioconcentração (FBC) do fígado em relação ao músculo variou de 3,37 a 136,36 no ariacó, e de 6,34 a 64,09 na quatinga. Em ambas as espécies, o menor FBC foi do arsênio e o maior valor foi do ferro (Figura 2).

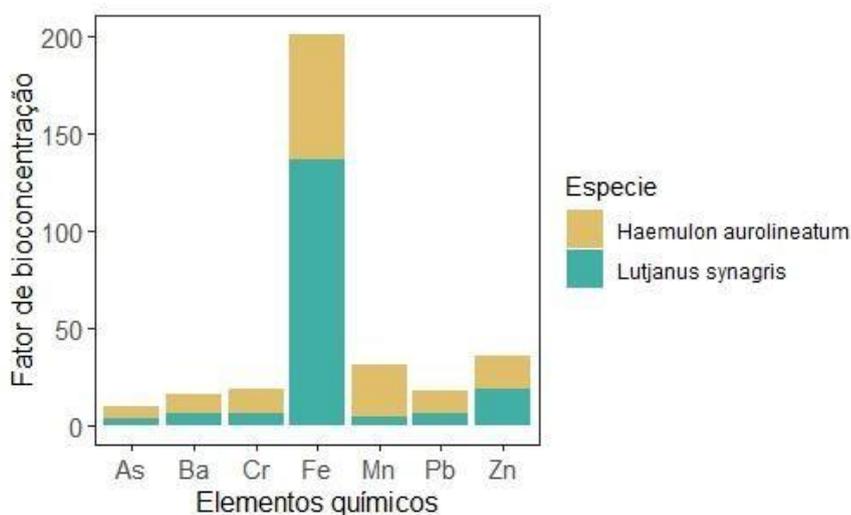


Figura 2. Fator de bioconcentração dos elementos químicos no fígado em relação ao músculo de peixes do litoral da Bahia

Os valores de bioconcentração do fígado em relação ao músculo foram superiores a 1 o que confirma a bioacumulação dos elementos químicos. Portanto, nossa hipótese que a

fisiologia do tecido do peixe influencia nos níveis de absorção de metais, foi corroborada, sendo o fígado o principal órgão bioacumulador. Esse padrão foi observado em outros estudos de bioacumulação (Matos, 2016; Sheikhzadeh and Hamidian, 2021; Wang et al., 2019).

A menor concentração de metais no músculo é justificada por não ser um local ativo para a desintoxicação (Bashir and Alhemmati, 2016), enquanto a maior bioacumulação no fígado é explicada pela sua função no armazenamento, redistribuição, desintoxicação ou transformação de contaminantes, portanto, tornando-se um alvo também para os efeitos patológicos decorrentes da bioacumulação (Kindie et al., 2020).

A razão entre a concentração de As no fígado e no músculo pode indicar um grau de estresse aos organismos. O valor maior que 1 significa altas concentrações no tecido hepático, sugerindo estresse associado ao aumento da atividade excretora (Azcue and Dixon, 1994). Sendo assim, possivelmente as espécies apresentam estresse metabólico, considerando os altos valores de FBC do As: 3,37 em *L. synagris* e 6,34 em *H. aurolineatum*.

O Fe apresentou maior fator de bioconcentração, isso significa que o fígado bioacumulou mais esse elemento químico do que os demais avaliados. Esse padrão se repetiu nas duas espécies, o que indica maior biodisponibilidade de Fe no ambiente. O ferro é o metal mais abundante do planeta, contudo, sugere-se que o distúrbio do óleo possa ter aumentado a sua concentração no ambiente, pois é um dos metais mais abundantes do petróleo, considerando o percentual metálico de sua composição química. Corroborando com outros estudos, Oliveira (2022) observou um aumento expressivo de metais, sendo o Fe o que apresentou maior concentração no sedimento de um estuário da Bahia após o derrame de óleo de 2019 e Abarshi et al. (2017) constataram altos valores de Fe, Zn e Cu no fígado, sugerindo associação ao derrame de petróleo na Nigéria.

Concentração dos elementos nos tecidos em função do ambiente

As figuras 3 e 4 apresentam as concentrações dos elementos químicos nos tecidos dos peixes que diferiram significativamente entre as localidades amostradas.

No tecido muscular, os peixes ariacó apresentaram maior nível de As em Itacaré, e maiores concentrações de Ba e Zn em Madre de Deus ($p < 0,0002$). No fígado, por sua vez, os peixes de Itacaré apresentaram menor nível de Ba, enquanto em Madre de Deus houve maiores concentrações de As e Zn em relação as outras populações ($p < 0,05$) (Figura 3).

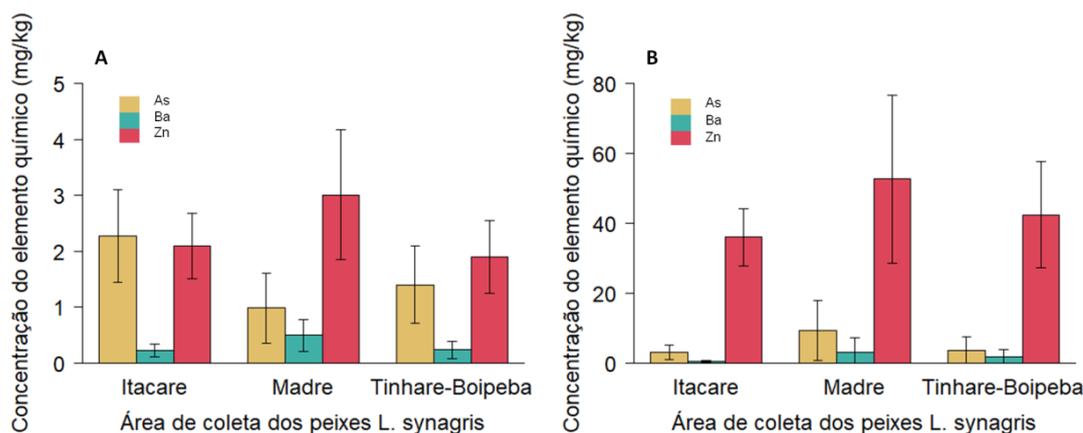


Figura 3. Concentração dos elementos químicos nos tecidos (A: músculo) e (B: fígado) de peixes da espécie *Lutjanus synagris* de diferentes ambientes afetados pelo óleo no litoral da Bahia

Considerando o tecido muscular da quatinga, os peixes em Tinhare-Boipeba apresentaram maior concentração de As, em Itacaré houve menor nível de Zn e, em Madre de Deus, apresentaram maiores concentrações de Fe e Mn ($p < 0,03$). Enquanto no fígado, os peixes em Madre de Deus apresentaram menor concentração de Fe e maiores níveis de As, Ba, Zn e Cr ($p < 0,05$) (Figura 4).

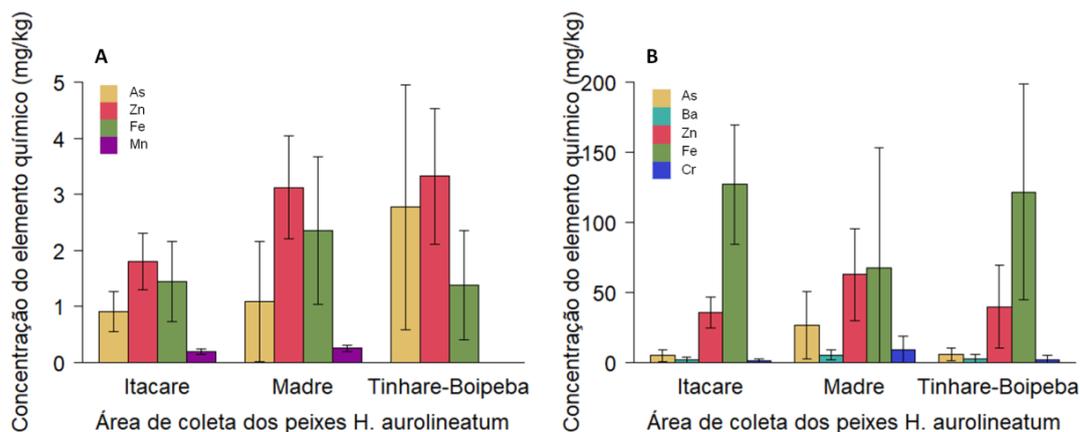


Figura 4. Concentração dos elementos químicos nos tecidos (A: músculo) e (B: fígado) de peixes da espécie *Haemulon aurolineatum* de diferentes ambientes afetados pelo óleo no litoral da Bahia

O As é um elemento tóxico para os seres vivos, e foi detectado nas populações de *Haemulon aurolineatum* e *Lutjanus synagris* dos três locais amostrados. As concentrações no tecido muscular da primeira espécie foram superiores aos valores observados em outros estudos em *H. aurolineatum* (0,11 e 0,25 mg/kg) (Gold-Bouchot, 2017) e em *Haemulon* sp. (0,52 mg/kg) (Squadrone, 2019). Em *L. synagris*, os valores de As foram superiores às concentrações encontradas em estudos anteriores ao derrame do óleo na Bahia: *Lutjanus analis* (não detectado) (Santana et al., 2017) e em *Lutjanus* sp (0,44 mg/L de As) (Silva et al., 2021).

A maior concentração de As (músculo) na quatinga de Tinharé-Boipeba pode ser atribuída ao derrame de óleo, visto que foi a área mais afetada. Possivelmente, esse distúrbio ambiental contribuiu para o aumento dos níveis de As nos ambientes, pois, em um estudo sobre a composição química do petróleo derramado em 2019, constatou que o As, assim como Hg, Cd, Pb e Zn foram os elementos mais abundantes (Soares et al., 2021).

Contudo, os valores mais elevados de As (músculo) no ariacó foram constatados em Itacaré, refutando a hipótese de que os peixes de área menos afetada pelo óleo apresentariam menor concentração quando comparada àqueles de áreas mais afetadas. Sendo assim, sugere-se que o derrame de óleo pode ter impactado as espécies de forma diferente, estendendo também aos organismos de áreas com menor registro de óleo. Salienta-se que *L. synagris* realiza migrações ontogenéticas, juvenis habitam águas rasas, enquanto os adultos migram para áreas mais profundas (Silva et al., 2018). Portanto, o comportamento migratório pode ter deslocado os peixes para áreas mais contaminadas, e mudar os padrões de acumulação (Guillante et al., 2023), pois em um estudo de modelagem da deriva do óleo, verificou-se que com 11 dias após o derrame, 60% do óleo já havia atingido 60 m de profundidade (Nobre et al., 2022).

Na literatura consultada não há estudos de contaminação por As em Itacaré, no entanto, a mobilidade dos elementos químicos pode explicar as diferenças nos padrões acumulativos, pois podem ser transportados de outras regiões através das correntes marinhas e dos organismos móveis, após processos de dissolução, dispersão e também incorporação na biomassa (Wang, 2020). Os metais migram entre os compartimentos ambientais, sendo que suas propriedades físico-químicas influenciam na mobilidade e disponibilidade dos elementos químicos (Martins et al., 2011).

O padrão de concentração de As no fígado foi similar no ariacó e na quatinga, sendo maior nos peixes em Madre de Deus. Isso indica maior biodisponibilidade desses elementos químicos nessa localidade para a bioacumulação. A concentração de As em *L. synagris* em Madre de Deus (9,26 mg/kg) foi superior aos valores encontrados no fígado nessa mesma espécie em outras áreas da BTS (1,38 e 3,78 mg/kg) (Silva et al., 2016). O As é um elemento do mesmo grupo do fósforo, e a semelhança química pode favorecer a ocorrência do arsenato, ao invés do fosfato. Dessa forma, pode trazer problemas do ponto de vista energético para os organismos, pois como hidrolisam mais rapidamente, não são boas fontes de armazenamento de energia (Aureliano et al., 2012).

As concentrações de Zn e Ba (músculo) no ariacó se destacaram em Madre de Deus em relação às outras áreas estudadas. Comparado às concentrações em peixes de outros

estudos realizados na BTS, nota-se uma diminuição nos níveis de Zn (3,03 mg/kg) e um enriquecimento de Ba (0,49 mg/kg), considerando os valores detectados em peixes carnívoros (6,07 mg/L de Zn e 0,18 mg/kg de Ba) (Santana, 2016), e em *Lutjanus analis* (6,03 mg/kg de Zn e 0,28 mg/kg de Ba) (Santana et al., 2017).

A menor concentração de Ba (fígado) no ariacó em Itacaré, comparada às outras localidades do estudo, indica que essa área conta com menor disponibilidade e/ou menor capacidade de bioacumulação desse elemento (Franco-Fuentes et al., 2021), visto que, esse processo é influenciado por fatores ambientais, como a concentração, biodisponibilidade e persistência dos metais no habitat, e pelo metabolismo do próprio organismo (Pan et al., 2022). O menor registro de óleo em Itacaré pode ter contribuído para esse padrão de menor concentração de Ba, pois é um dos constituintes do petróleo (Gioia, 2016) e está associado também em aplicações industriais, como a perfuração de petróleo (Peana et al., 2021).

O padrão de concentração de Zn no fígado foi similar no ariacó e na quatinga, sendo maior nos peixes em Madre de Deus, indicando mais uma vez, maior biodisponibilidade desse metal nessa região, o que favorece a bioacumulação. Os níveis de Zn no ariacó, nos três ambientes avaliados (36 a 52,6 mg/kg) foram superiores às concentrações em *Lutjanus griseus* (15,31 mg/kg) e em *Lutjanus campechanus* (12,51 mg/kg) (Nasri et al., 2018), assim como as concentrações na quatinga (35,5 a 62,6 mg/kg) foram maiores do que outros peixes da mesma espécie (4,7 a 10,7 mg/kg) (Hogstrand and Haux, 1990).

Os valores de Zn em ambas as espécies foram superiores à exigência nutricional para os peixes (15 a 40 mg/kg de Zn) (Chandrapalan and Kwong, 2021). O Zn é um dos metais predominantes nos sistemas biológicos, presente em diversas proteínas (Maret, 2016), está envolvido em funções do sistema imunológico, neurotransmissão e sinalização celular. No entanto, em níveis excessivos o Zn apresenta toxicidade e compete por sítios de ligação semelhantes, como o cobre, ferro e cálcio (Luo, 2011).

As concentrações de Mn e de Fe (músculo) e de Ba e Cr (fígado) na quatinga também foram superiores em Madre de Deus do que as demais localidades amostradas, indicando maior disponibilidade desses elementos na região. O nível de Fe (2,35 mg/kg) foi inferior à concentração em *Haemulon carbonarium* (11,8 mg/kg) e *Haemulon sciurus* (17,8 mg/kg), enquanto, a concentração de Mn (0,25 mg/kg) foi superior ao valor encontrado nas espécies supracitadas (<0,06 mg/kg) (Peña et al., 2017). Pereira (2014) constatou valores de Ba acima do *background* indicando poluição moderada a alta. Os níveis de Cr (8,59 mg/kg) foram elevados quando comparados às concentrações no fígado em cinco espécies de peixes da BTS

(2,65 a 5,46 mg/kg) (Silva et al. 2016). Quando a entrada desses compostos no organismo excede a eliminação, ocorre a bioacumulação (Pan et al., 2022).

As maiores concentrações metálicas nos peixes em Madre de Deus podem estar associadas à exploração petrolífera na região da BTS, uma vez que há registro de contaminação por metais no ambiente e em organismos desde 1975 (Hatje et al., 2009). Os distúrbios se sobrepõem e se acumulam no tempo e no espaço, o que podem alterar a estrutura de populações, comunidades e dinâmica dos ecossistemas, sendo assim, um indicativo de distúrbio ecológico crônico, cujos efeitos são cumulativos (Bastitti et al., 2016).

Esse padrão pode ter contribuição também da dinâmica ambiental, visto que a Baía de Todos os Santos é um sistema estuarino, que recebe a descarga de água de três grandes bacias hidrográficas: rio Paraguaçu, Jaguaripe e Subaé, e dos pequenos cursos d'água periféricos (Hatje and Andrade, 2009). Os estuários estão frequentemente expostos a contaminantes transportados pelas águas continentais e marinhas, sendo assim, a dinâmica ambiental desses sistemas favorece a deposição de contaminantes, como os metais (Silva et al., 2023).

Concentração dos elementos em função dos aspectos populacionais

As figuras 5 e 6 apresentam os níveis dos elementos químicos nos tecidos dos peixes que variaram estatisticamente entre juvenis e adultos, e as figuras 7 e 8 demonstram as diferenças na concentração química entre os estágios de maturação das gônadas.

No tecido muscular, o ariacó apresentou maior concentração de As na fase adulta ($p=0,001$), e de Zn na fase juvenil ($p=0,02$). Enquanto no fígado dessa mesma espécie, os valores de todos os elementos (As, Ba, Cr e Zn) foram superiores nos juvenis ($p<0,006$) (Figura 5).

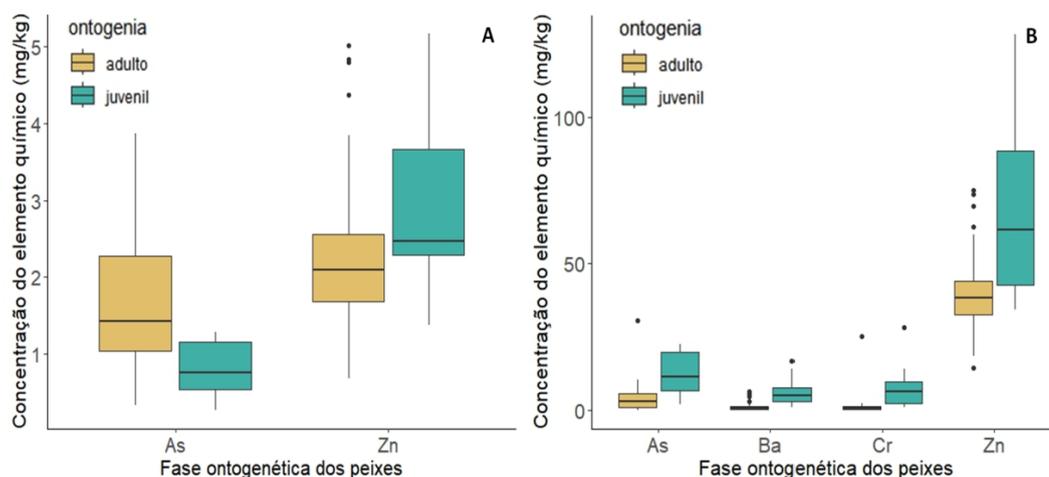


Figura 5. Concentração dos elementos químicos nos tecidos (A: músculo e B: fígado) de peixes adultos e juvenis da espécie *Lutjanus synagris*

No músculo da quatinga, as concentrações dos elementos químicos (Ba e Zn) foram maiores nos juvenis. No fígado, foi observado o mesmo padrão de acumulação para o Ba, Zn, As e Cr, maior nos juvenis, diferente do Fe que teve sua concentração superior na fase adulta ($p < 0,05$).

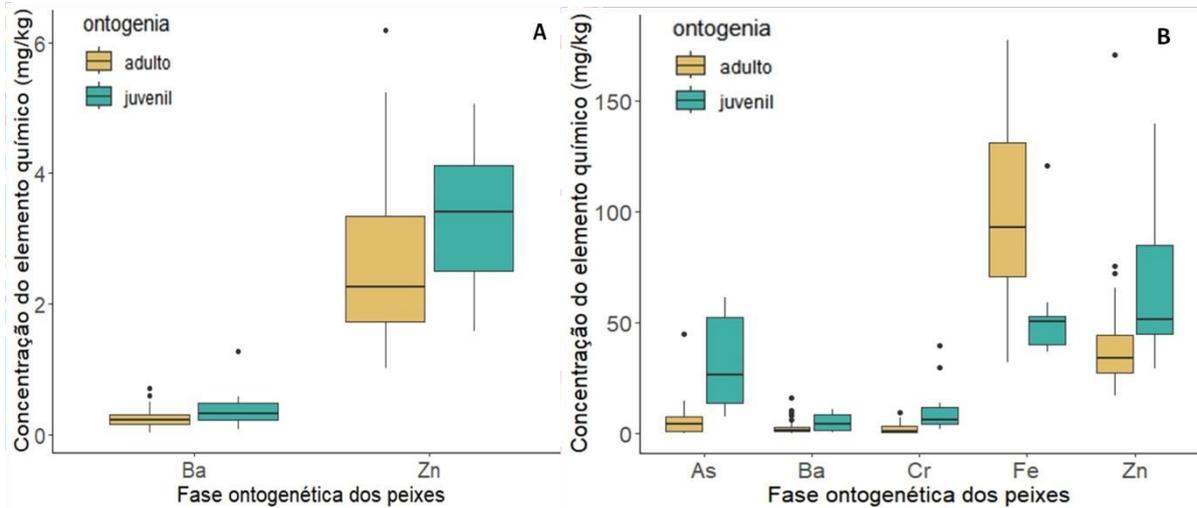


Figura 6. Concentração dos elementos químicos nos tecidos (A: músculo e B: fígado) de peixes adultos e juvenis da espécie *Haemulon aurolineatum*

Os peixes ariacó em maturação (fase II) apresentaram maior nível de As no músculo do que os imaturos (fase I) ($p = 0,01$). No tecido hepático, as concentrações de As, Ba, Cr e Zn foram maiores nos imaturos do que nos estágios posteriores da maturação, enquanto, o nível de Cu foi maior nos peixes da fase II do que no estágio final do ciclo reprodutivo (fase V) ($p < 0,02$).

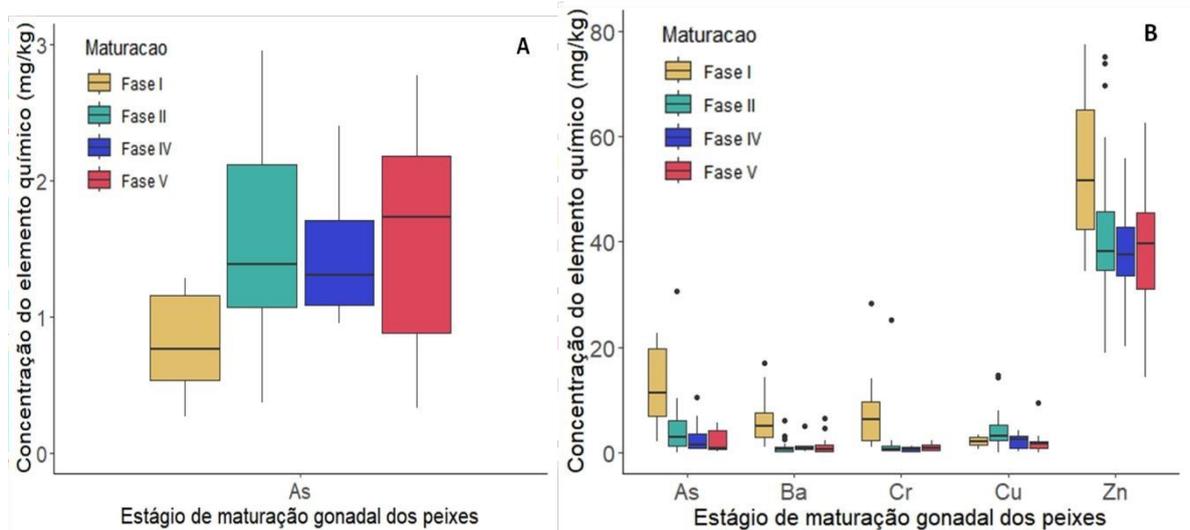


Figura 7. Concentração dos elementos químicos nos tecidos (A: músculo e B: fígado) de peixes da espécie *Lutjanus synagris* em diferentes estágios de maturação gonadal

A quatinga apresentou maior concentração de Zn no músculo de imaturos do que no estágio em regressão (fase IV) ($p=0,02$). No fígado, foi observado o mesmo padrão de acumulação para o As, Cr e Zn, maior nos imaturos, diferente do Fe que teve sua concentração superior na fase IV do que na fase I ($p<0,01$).

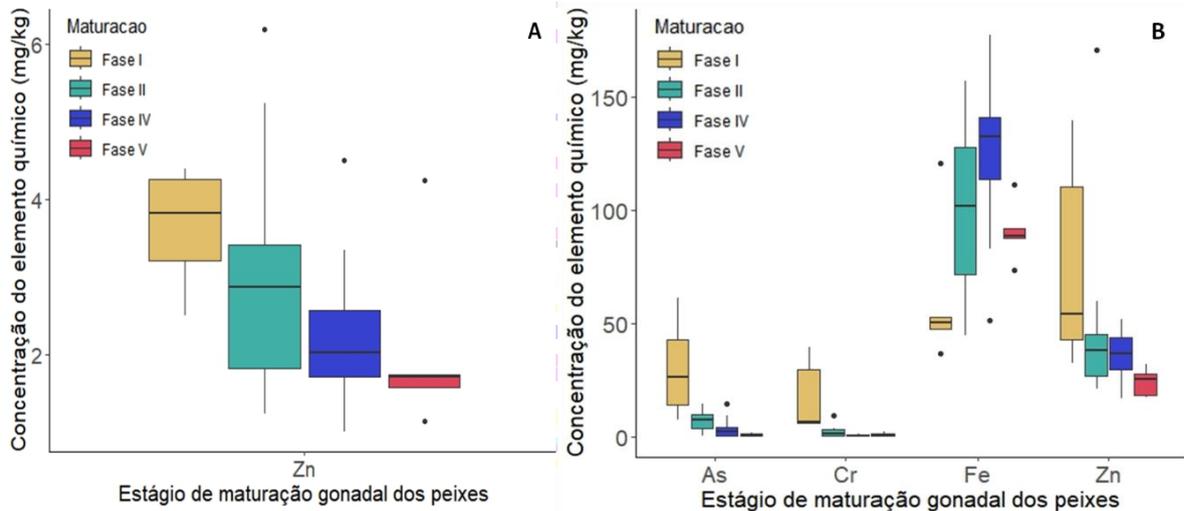


Figura 8. Concentração dos elementos químicos nos tecidos (músculo e fígado) de peixes da espécie *Haemulon aurolineatum* em diferentes estágios de maturação gonadal

Em geral, os peixes jovens/imaturos apresentaram maior concentração de metais do que os espécimes maduros, pois demandam uma maior taxa metabólica para o crescimento, e apresentam menor capacidade de desintoxicação (Lozzano-Bilbão et al., 2020). Enquanto alguns elementos influenciaram mais a fase adulta, corroborando com outros estudos (Ashraf et al., 2012). Esse resultado mostra que os elementos químicos atuam diferentemente nas fases do ciclo de vida dos peixes. Os adultos/maduros podem ter tido maior tempo de exposição a alguns elementos, pois se suas concentrações estiverem altas no ambiente, a acumulação ocorre de forma contínua (Yi and Zhang, 2012).

As diferenças na concentração química entre as fases do ciclo de vida ratificam que os efeitos dos distúrbios ambientais dependem da sensibilidade dos organismos, embora pertençam a mesma espécie (Battisti et al., 2016). As variações na dieta e no uso do habitat corroboram para as diferenças na bioacumulação dos metais entre os organismos (Jiang et al., 2022). O ariacó realiza migração ontogenética (Silva et al. 2018) e a quatinga apresenta diferença no padrão de forrageamento em função do ciclo de vida (Darcy, 1983).

A ontogenia e maturação foram aspectos populacionais importantes para a concentração química nos peixes estudados, os quais foram influenciados pelos mesmos elementos, exceto o Cu que variou seus níveis apenas entre os estágios de maturação. As

maiores concentrações de Cu e As ocorreram nos peixes em maturação, nessa fase se inicia o ciclo reprodutivo.

Esses elementos afetam negativamente o sistema endócrino reprodutivo dos peixes. O cobre impede o desenvolvimento das gônadas e reduz a motilidade dos gametas masculinos. O arsênio inibe a espermatogênese e oogênese, reduz o número de ovócitos e espermatozoides maduros (Taslina et al., 2022). Mesmo em baixas concentrações, o As provoca a inibição da espermatogênese (Kumari et al., 2016). Sendo assim, esses elementos químicos podem ter contribuído para a ausência do estágio reprodutivo ativo nos peixes estudados. No entanto, estudos mais pormenorizados são necessários para confirmar essas inferências.

Os peixes machos de *L. synagris* apresentaram maiores concentrações de Zn no músculo ($p=0,04$) e de Ba no fígado ($p=0,01$) do que as fêmeas. Em contrapartida, na quatinganã houve variação entre as concentrações de metais entre os sexos em nenhum dos tecidos avaliados ($p>0,05$). Portanto, o sexo foi um atributo ecológico importante apenas para oariacó, sendo que os machos apresentaram maior sensibilidade a incorporá-los. Cada organismo ou grupo de organismos apresenta traços ecológicos específicos que os tornam mais sensíveis a certas perturbações (Battisti et al., 2019). No caso específico dos ariacós, essas diferenças na absorção entre os sexos também exigem mais estudos para serem corroboradas.

Essa diferença sexual na concentração química pode também ser atribuída às diferenças na dieta, pois é uma das principais vias de entrada de contaminantes no organismo e podem ser transferidos ao longo da cadeia alimentar (Jiang, 2022). Fernandes et al. (2021) identificaram variação na composição alimentar entre os sexos em ariacó no nordeste do Brasil, sendo que as fêmeas consumiram mais peixes e caranguejos, enquanto nos machos a maior prevalência foi de camarões.

Na análise de correlação do comprimento total (CT) do peixe com os níveis de metais, foi observada correlação negativa significativa com alguns elementos, nas espécies estudadas. No ariacó, o CT está correlacionado ($p<0,05$) com o Ba (-0,44) e Cr (-0,68), e na quatinga o CT apresentou correlação ($p<0,03$) com o As (-0,55) e Cr (-0,50). Portanto, infere-se que o aumento nas concentrações desses elementos químicos reduziu o comprimento desses peixes. Jiang et al. (2022) e Ko et al. (2019) verificaram também o efeito negativo dos metais na biometria dos peixes, refletindo a toxicidade sobre o crescimento.

As concentrações de Ba influenciaram negativamente o fator de condição (FC) ($p=0,03$; $r=-0,39$) de *L. synagris*. Em *H. aurolineatum*, houve correlação negativa ($p<0,05$) desse índice com o As (-0,47) e Zn (-0,55), e, portanto, esses elementos químicos podem estar

diminuindo a condição corporal dos peixes. Verma and Prakash (2019) e Xu et al. (2023) também relataram decréscimo neste índice fisiológico devido ao aumento da concentração desses elementos. Os peixes respondem à condição estressante provocada pela exposição de metais utilizando mais energia dos carboidratos, proteínas e lipídios reservados no corpo (Shahjahan et al., 2022). Embora o Zn seja um metal essencial, altas concentrações de Zn podem reduzir a deposição de lipídios corporais, e assim diminuir o FC (Xu et al., 2023).

Estudos relatam a redução no nível da glicose, quando os peixes são expostos aos metais, enquanto outros estudos apontam para um aumento nos níveis de glicose associado à quebra do glicogênio (glicogenólise). Em ambas situações ocorre a redução nas reservas energéticas. A exposição aos metais libera o cortisol, altos níveis desse hormônio ativa o processo de glicogenólise (Shahjahan et al., 2022).

No entanto, o nível de As no ariacó está positivamente correlacionado com o FC ($p=0,01$; $r= 0,39$). Outros estudos também constataram essa relação positiva com outros elementos tóxicos, em algumas espécies (Yi and Zhang, 2012; Noel et al., 2013), atribuída a maior capacidade de absorção e menor taxa de eliminação do elemento. A exposição contínua dos peixes aos metais acontece devido à persistência desses elementos químicos no ambiente (Shahjahan et al., 2022).

O índice hepatossomático (IHS) de *L. synagris* foi afetado negativamente ($p<0,01$) pelo As (-0,48), Ba (-0,59), Cr (-0,54), Fe (-0,41) e Zn (-0,46). A redução nesse índice também foi constatada em outros estudos devido ao aumento da concentração química (Ko et al., 2019; Verma and Prakash, 2019). Contudo, em *H. aurolineatum*, nenhum metal interferiu no IHS ($p>0,05$), e isso indica que esse índice não está sob efeito dos contaminantes inorgânicos avaliados nessa espécie. Os impactos dos distúrbios físico-químicos dependem da tolerância (ou sensibilidade) das espécies e dos organismos da mesma espécie que apresentam variação em seus traços ecológicos (Battisti et al., 2016).

Os dois primeiros eixos da PCA produzidos para *H. aurolineatum* explicaram 55,8% da variação total do comprimento, fator de condição e metais entre os peixes estudados (Figura 9). O primeiro eixo PC1 explica 28,0% da variação e apresentou contribuição negativa para o fator de condição, e positiva para o valor de Zn (músculo) e As (fígado), e o segundo eixo PC2 explica 27,8% da variação, e relacionou-se a valores positivos de comprimento total, As (músculo) e Cr (fígado).

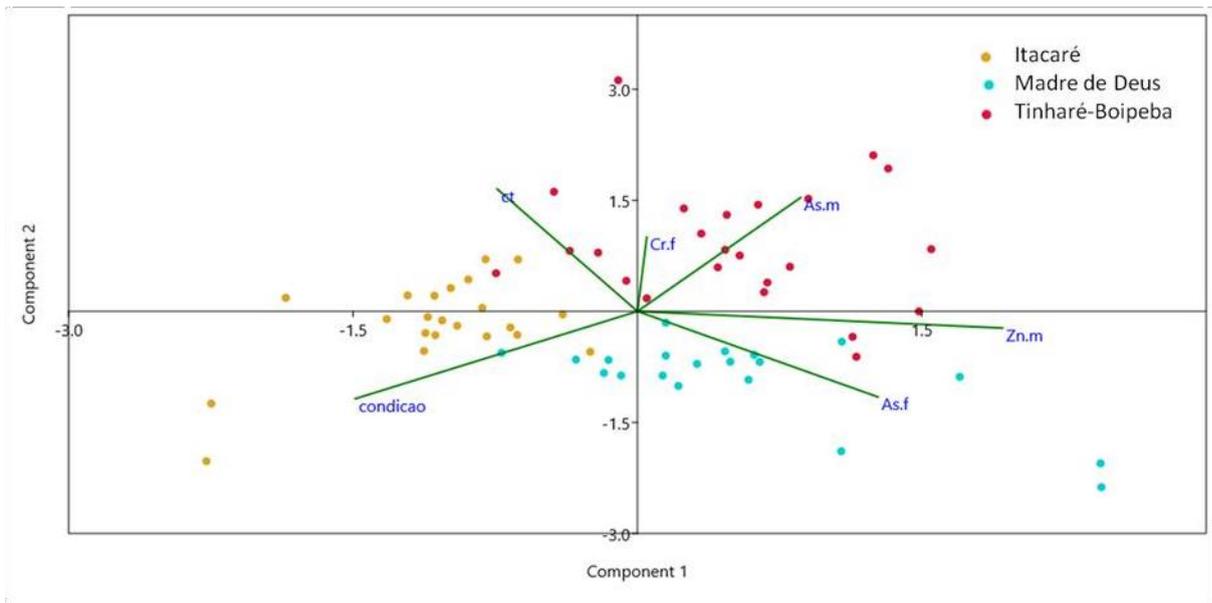


Figura 9. Gráfico de ordenação de análise de componentes principais (PCA) mostrando os padrões de variação do comprimento, fator de condição e dos elementos químicos em populações de *Haemulon aurolineatum* de três localidades do litoral da Bahia.

Legenda: ct (comprimento total do peixe), condicao (fator de condição), As.m (arsênio no músculo), Zn.m (zinco no músculo), As.f (arsênio no fígado), Cr.f (cromo no fígado)

Os dois primeiros eixos da PCA produzidos para *L. synagris* explicaram 52,6% da variação total dos fatores biológicos e metais entre os peixes estudados (Figura 10). O primeiro eixo PC1 explica 37,2% da variação, estando relacionado de forma negativa ao fator de condição e ao valor de As (músculo e fígado), e positiva aos valores de Ba, Cr e Zn (fígado), e o segundo eixo PC2 explica 15,4% da variação e apresentou maior contribuição positiva para o comprimento e Fe (fígado), e negativa para o índice hepatossomático.

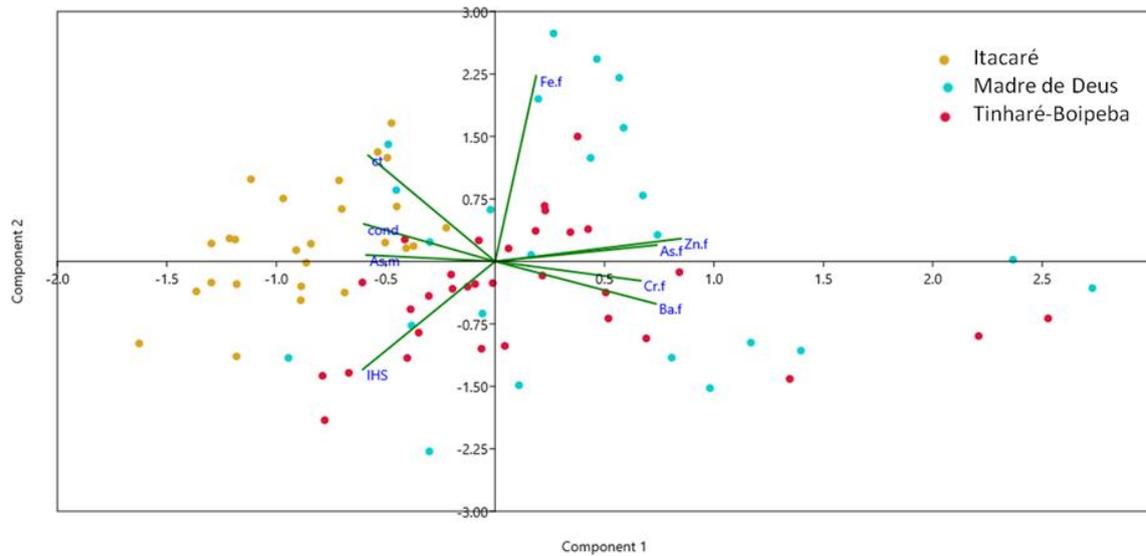


Figura 10. Gráfico de ordenação de análise de componentes principais (PCA) mostrando os padrões de variação do comprimento, fator de condição, índice hepatossomático e elementos químicos em populações de *Lutjanus synagris* de três localidades do litoral da Bahia.

Legenda: **ct** (comprimento total do peixe), **cond** (fator de condição), **IHS** (índice hepatossomático), **As.m** (arsênio no músculo), **As.f** (arsênio no fígado), **Ba.f** (bário no fígado), **Cr.f** (cromo no fígado), **Zn.f** (zinco no fígado) e **Fe.f** (ferro no fígado).

Em ambas as espécies, a ordenação da PCA mostrou uma separação dos peixes de Itacaré das demais populações, os quais estão agrupados exclusivamente no lado esquerdo do PC1 (Figuras 9 e 10). No gráfico de ordenação PCA de *Haemulon aurolineatum* (Figura 9) foi observado também outro padrão, a separação das populações ao longo do PC2, com a população de Tinharé-Boipeba posicionando-se na parte do superior do eixo, e Madre de Deus na parte inferior do eixo, indicando que cada população respondeu diferentemente aos parâmetros analisados, e esse agrupamento das populações pode ter sido influenciado pela diferença na contaminação por óleo entre as áreas estudadas.

As variáveis biológicas (comprimento e índices fisiológicos) estão posicionadas no lado esquerdo do PC1 e os elementos químicos no lado direito do PC1, exceto o As (músculo) no ariacó. Isso é um indicativo da tendência antagonista entre as variáveis, cujos elementos podem estar afetando o desenvolvimento dos peixes. Esse padrão corrobora com outros estudos que observaram o efeito dos metais na redução do crescimento (Jiang et al., 2022), no fator de condição (Xu et al., 2023) e no índice hepatossomático (Ko et al., 2019). A toxicidade dos metais está associada à produção de espécies reativas de oxigênio (ERO) que causa estresse oxidativo, interfere nos índices de condição, danos nas membranas celulares e no DNA, e alterações histopatológicas (Javed and Usmani, 2019; Shahjahan et al., 2022).

A bioacumulação de contaminantes nos peixes significa que esses elementos químicos estão disponíveis para os seus respectivos predadores (incluindo a espécie humana), e, essa transferência na cadeia alimentar é chamada de biomagnificação (Burger and Gochfeld, 2011). A tabela 4 apresenta as concentrações dos elementos tóxicos (As, Cd e Pb) em *L. synagris* (ariacó) e *H. aurolineatum* (quatinga) e os valores máximos estabelecidos pela Anvisa (2013). Sendo assim, a análise química do músculo permitiu avaliar os riscos potenciais à saúde humana através do consumo, pois essas espécies são alvos da pesca em várias regiões do mundo e importantes para as comunidades costeiras da Bahia, sobretudo, *Lutjanus synagris* (ariacó) que é uma espécie de grande valor comercial.

Tabela 4. Concentração dos elementos tóxicos (mg/kg) no músculo de peixes (*L. synagris* e *H. aurolineatum*) em três ambientes afetados pelo óleo e os níveis máximos determinados pela ANVISA (2013).

Elementos químicos	<i>Lutjanus synagris</i>			<i>Haemulon aurolineatum</i>			Resolução 42/2013 (Anvisa)
	Itacaré	Tinharé-Boipeba	Madre de Deus	Itacaré	Tinharé-Boipeba	Madre de Deus	
Arsênio	2,27 ±0,83	1,40 ±0,69	0,98±0,63	0,91±0,36	2,77 ±2,19	1,08 ±1,07	1,0 mg/kg
Cádmio	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0,05 mg/kg
Chumbo	0,24±0,12	0,20±0,11	0,48 ±1,01	0,17±0,10	<LD	0,44 ±0,40	0,3 mg/kg

Legenda: LD = Limite de detecção

Nossos resultados apontam para a contaminação de As nas duas espécies estudadas de Tinharé-Boipeba, no ariacó de Itacaré e na quatinga de Madre de Deus. Os níveis de As nas outras populações de peixes estão muito próximos à concentração máxima permitida pela legislação brasileira, portanto, considera-se um sinal de alerta para o consumo dos peixes nas três áreas de estudo (Anvisa, 2013). Os altos níveis de As também em Itacaré indica inclusive, o risco de contaminação independentemente do acidente com óleo, por ser esta área a menos atingida neste estudo.

Os níveis de Cd não foram detectáveis em nenhuma espécie, esse resultado pode ser considerado positivo, dada a toxicidade desse metal (Santana et al., 2017). Todavia, foi constatada a contaminação por Pb nas espécies de peixes em Madre de Deus. A ingestão de peixes contaminados consiste na principal via de transferência metálica para os seres humanos, o que desencadeia sérios problemas de saúde para os consumidores (Varol et al., 2022). O consumo de pescado com níveis de metais acima dos limites aceitáveis desencadeia doenças crônicas, tais como, problemas neurológicos, hepáticos e renais (Viana et al., 2023).

Considerações finais

A maior concentração de As no músculo da quatinga foi encontrada na população em Tinharé-Boipeba, a área mais afetada pelo derrame de óleo, no entanto, no ariacó, os maiores níveis foram em Itacaré, a área menos afetada pelo distúrbio ambiental. Sendo assim, o derramamento de óleo pode ter impactado as espécies de forma diferente, estendendo também aos organismos de áreas com menor registro de óleo. Ressalta-se que o grande deslocamento realizado pelos ariocós durante seu ciclo de vida pode ter potencializado esta contaminação.

Considerando que a fisiologia dos tecidos dos peixes influencia na absorção dos metais, e sendo o fígado o principal órgão bioacumulador, observaram-se as maiores concentrações em Madre de Deus, região afetada cronicamente. Os resultados indicam que, possivelmente, o distúrbio crônico do óleo tenha contribuído mais para a bioacumulação de metais do que o distúrbio agudo em 2019.

A ontogenia e o estágio de maturação foram aspectos populacionais importantes para a bioacumulação de metais nas espécies, no entanto, o sexo influenciou a capacidade acumulativa apenas em *L. synagris*. Em geral, os peixes jovens/imaturos apresentaram maior concentração dos elementos químicos (Ba, As, Cr e Zn) do que os espécimes adultos/maduros, e os machos de *L. synagris* apresentaram maiores níveis de Ba do que as fêmeas.

Alguns elementos químicos estão relacionados com o desenvolvimento dos peixes: Ba, As e Cr influenciaram negativamente o crescimento, Ba e Zn reduziram a condição corporal, enquanto o As influenciou diferentemente o fator de condição de cada espécie (relação negativa na quatinga e positiva no ariacó). Os elementos supracitados e o Fe afetaram também a condição fisiológica do fígado do ariacó, reduzindo o índice hepatossomático.

A análise química do músculo do ariacó e quatinga permitiu avaliar os riscos potenciais à saúde humana através do consumo. Apenas os peixes em Madre de Deus apresentaram contaminação por chumbo, enquanto, as concentrações de arsênio nas espécies de Itacaré, Tinharé-Boipeba e Madre de Deus foram acima ou próximas do valor máximo aceitável pela legislação brasileira, portanto, considera-se um sinal de alerta para o consumo dos peixes nas três áreas estudadas.

Dada as diferenças no nível dos metais entre as espécies, tecidos, fases do ciclo de vida, estágios de maturação e entre as localidades amostradas, esse estudo evidencia que os fatores ambientais e os aspectos biológicos influenciam na capacidade acumulativa dos elementos químicos nos peixes avaliados.

Agradecimentos

Esse estudo é parte da dissertação de mestrado desenvolvida no Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Evolução da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS) com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB). Agradecemos ao Projeto “Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) em Ambientes Marinhos Tropicais – AmbTropic – fase II” e ao Laboratório de Ictiologia e Pesca (LIPE) da UEFS pela obtenção dos peixes analisados, especialmente a Natália Souza por disponibilizar os exemplares para esse estudo, ao Laboratório de Geoquímica e Catálise Ambiental (LGCA) da UEFS e ao Laboratório de Estudos de Petróleo (LEPETRO) da Universidade Federal da Bahia (UFBA) pelo apoio nas análises laboratoriais.

Referências

- Abarshi, M.M., Dantala, E.O., Mada, S.B., 2017. Bioaccumulation of heavy metals in some tissues of croaker fish from oil spilled rivers of Niger Delta region, Nigeria. *Asian Pac. J. Trop. Biomed.* 7, 563–568. <https://doi.org/10.1016/j.apjtb.2017.05.008>
- Adebiyi, F.M., Ayeni, D.A., 2022. Chemical speciation, bioavailability and risk assessment of potentially toxic metals in soils around petroleum product marketing company as environmental degradation indicators. *Pet. Res.* 7, 286–296. <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2021.08.006>
- Anvisa, 2013. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução - RDC n° 42 de 29 de agosto de 2013.
- Araújo, M.E., Ramalho, C.W.N., Melo, P.W., 2020. Artisanal fishers, consumers and the environment: immediate consequences of the oil spill in Pernambuco, Northeast Brazil. *Cad. Saude Publica* 36, 1–6. <https://doi.org/10.1590/0102-311X00230319>
- Ashraf, M.A., Maah, M.J., Yusoff, I., 2012. Bioaccumulation of heavy metals in fish species collected from former tin mining catchment. *Int. J. Environ. Res.* 6, 209–218.
- Aureliano, M., Nolasco, P.A., Silva, J.J.R.F. da, Silva, J.A.L. da, 2012. Os semimetais na origem e evolução da vida. *Quim. Nova* 35, 1062–1068. <https://doi.org/10.1590/s0100-40422012000500036>
- Azcue, J.M., Dixon, D.G., 1994. Effects of past mining activities on the arsenic concentration in fish from Moira Lake, Ontario. *J. Great Lakes Res.* 20, 717–724. [https://doi.org/10.1016/S0380-1330\(94\)71189-8](https://doi.org/10.1016/S0380-1330(94)71189-8)
- Bashir, F.A., Alhemmal, E.M., 2015. Analysis of some heavy metal in marine fish in muscle, liver and gill tissue in two marine fish species from Kapar coastal waters, Malaysia. *Second Symp. Theor. Appl. Basic Biosci.* 1, 1–16.
- Battisti, C., Poeta, G. and Faneli, G. 2016. *An introduction to disturbance ecology: a road map for wildlife management and conservation.* Springer International Publishing, Cham, Switzerland.
- Beever, E.A., Prange, S., DellaSala, D.A., 2019. *Disturbance ecology and biological diversity: scale, context and nature*, 1^a. ed. Boca Raton.
- Bonsignore, M., Salvagio Manta, D., Mirto, S., Quinci, E.M., Ape, F., Montalto, V., Gristina, M., Traina, A., Sprovieri, M., 2018. Bioaccumulation of heavy metals in

- fish, crustaceans, molluscs and echinoderms from the Tuscany coast. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 162, 554–562. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.07.044>
- Burger, J., Gochfeld, M., 2011. Mercury and selenium levels in 19 species of saltwater fish from New Jersey as a function of species, size, and season. *Sci. Total Environ.* 409, 1418–1429. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.12.034>
- Chandrapalan, T., Kwong, R.W.M., 2021. Functional significance and physiological regulation of essential trace metals in fish. *J. Exp. Biol.* 224, 1–12. <https://doi.org/10.1242/jeb.238790>
- Darcy, G.H., 1983. Synopsis of Biological Data on the Grunts *Haemulon aurolineatum* and *H. plum/en* (Pisces: Haemulidae). NOM Tech. Rep. NMFS Circ. 448, FAO Fish. Synopsis No. 133 37.
- Eyankware, M.O., Obasi, P.N., 2021. A holistic review of heavy metals in water and soil in Ebonyi SE, Nigeria; with emphasis on its effects on human, plants and aquatic organisms. *World News Nat. Sci.* 38, 1–19.
- Fernandes, J.F.F., Freitas, J., Nunes, Y.B.S., Lobato, R.S., Figueiredo, M.B., 2021. Feeding habits of *Lutjanus synagris* (Teleostei: Lutjanidae) in the Amazon Coast of the Northeast Region of Brazil. *Bol. do Inst. Pesca* 46, 1–12. <https://doi.org/10.20950/1678-2305.2020.46.4.592>
- Förstner, U., Wittmann, G.T.W., 1981. Metal pollution in the aquatic environment, 2^a ed, *Metal Pollution in the Aquatic Environment*. Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-69385-4>
- Fortes, W.M.P.A., Souza, I. da C., Azevedo, V.C., Griboff, J., Monferrán, M.V., Wunderlin, D.A., Matsumoto, S.T., Fernandes, M.N., 2023. Metal/metalloid bioconcentration dynamics in fish and the risk to human health due to water contamination with atmospheric particulate matter from a metallurgical industrial area. *Sci. Total Environ.* 902, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166119>
- Franco-Fuentes, E., Moity, N., Ramírez-González, J., Andrade-Vera, S., González-Weller, D., Hardisson, A., Paz, S., Rubio, C., Gutiérrez, Á., 2021. Metal and metalloids concentration in Galapagos fish liver and gonad tissues. *Mar. Pollut. Bull.* 173, 1–10.
- Gioia, R.R., 2016. Determinação das formas de arsênio em amostras de óleo cru utilizando a técnica de espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Gold-Bouchot, G., Rubio-Piña, J., Montero-Muñoz, J., Ramirez-Miss, N., Echeverría-García, A., Patiño-Suarez, V., Puch-Hau, C.A., Zapata-Pérez, O., 2017. Pollutants and biomarker responses in two reef fish species (*Haemulon aurolineatum* and *Ocyurus chrysurus*) in the Southern Gulf of Mexico. *Mar. Pollut. Bull.* 1, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.12.073>
- Guillante, T., Fonseca, J. da S., Costa, P.G., Bianchini, A., Robaldo, R.B., Zebal, Y.D., 2023. Sex-biased response of pollution biomarkers in fish: Insights from the killifish *Poecilia vivipara*. *Aquat. Toxicol.* 261, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2023.106613>
- Hatje, V., Andrade, J.B., 2009. Baía de Todos os Santos: aspectos oceanográficos. Salvador.
- Hogstrand, C., Haux, C., 1990. Metallothionein as an indicator of heavy-metal exposure in two subtropical fish species. *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.* 138, 69–84. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(90\)90177-E](https://doi.org/10.1016/0022-0981(90)90177-E)
- Ibama. 2020. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Localidades atingidas. Brasília: Ibama, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/fiscalizacao-e-protecao-ambiental/emergencias-ambientais/manchasdeoleo/localidades-atingidas>

- Javed, M., Usmani, N., 2019. An overview of the adverse effects of heavy metal contamination on fish health. *Proc. Natl. Acad. Sci. India Sect. B - Biol. Sci.* 89, 389–403. <https://doi.org/10.1007/s40011-017-0875-7>
- Jiang, X., Wang, J., Pan, B., Li, D., Wang, Y., Liu, X., 2022. Assessment of heavy metal accumulation in freshwater fish of Dongting Lake, China: Effects of feeding habits, habitat preferences and body size. *J. Environ. Sci.* 112, 355–365. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.05.004>
- Juśkiewicz, W., Gierszewski, P., 2022. Toxic metal pollution of aquatic ecosystems of European Union nature protection areas in a region of intensive agriculture (Lake Gopło, Poland). *Aquat. Sci.* 84, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s00027-022-00884-1>
- Kindie, M., Andargie, M., Hilluf, W., Amare, M., 2020. Assessment on level of selected heavy metals in Nile tilapia and *Barbus* fish species and water samples from the Southern parts of Lake Tana, Ethiopia. *Sci. African* 9, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00519>
- Ko, H.; Park, H.; Kang, J. Change of growth performance, hematological parameters, and plasma component by hexavalent chromium exposure in starry flounder, *Platichthys stellatus*. *Fisheries and Aquatic Sciences.* 22, 1-7.
- Kumari, B., Kumar, V., Sinha, A.K., Ahsan, J., Ghosh, A.K., Wang, H., DeBoeck, G., 2017. Toxicology of arsenic in fish and aquatic systems. *Environ. Chem. Lett.* 15, 43–64. <https://doi.org/10.1007/s10311-016-0588-9>
- Lall, S.P., Kaushik, S.J., 2021. Nutrition and metabolism of minerals in fish. *Animals* 11, 1–41. <https://doi.org/10.3390/ani11092711>
- Lemus, M., Castañeda, J., Chung, K., 2014. Heavy metals in fish and invertebrates from the gulf of Paria, Venezuela. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 30, 137–142.
- Loureiro, R.C., Hepp, L.U., 2020. Stream contamination by trace elements: Biota incorporation and phytoremediation. *Acta Limnol. Bras.* 32, 1–9. <https://doi.org/10.1590/s2179-975x2219>
- Lozano-Bilbao, E., Lozano, G., Jiménez, S., Jurado-Ruzafa, A., Hardisson, A., Rubio, C., Weller, D.G., Paz, S., Gutiérrez, Á.J., 2020. Ontogenic and seasonal variations of metal content in a small pelagic fish (*Trachurus picturatus*) in northwestern African waters. *Mar. Pollut. Bull.* 156, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111251>
- Luo, Z.; Tan, XY; Zheng, JL; Chen, QL; Liu, CX Quantitative dietary zinc requirement of juvenile yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco*, and effects on hepatic intermediary metabolism and antioxidant responses. *Aquicultura* 2011 , 319 , 150– 155.
- Magris, R.A., Giarrizzo, T., 2020. Mysterious oil spill in the Atlantic Ocean threatens marine biodiversity and local people in Brazil. *Mar. Pollut. Bull.* 153. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.110961>
- Maret, W., 2016. The metals in the biological periodic system of the elements: Concepts and conjectures. *Int. J. Mol. Sci.* 17, 1–8. <https://doi.org/10.3390/ijms17010066>
- Martins, C.A. da S., Nogueira, N.O., Ribeiro, P.H., Rigo, M.M., Candido, A. de O., 2011. A dinâmica de metais-traço no solo. *R. Bras. Agrobiologia* 17, 383–391.
- Matos, L.S., Silva, D.R., Silva, J.O. dos S., Andrade, R.L.T., Carvalho, L.N., 2016. Essential oil from *Chenopodium ambrosioides* L.: Secretory structures, antibacterial and antioxidant activities. *Acta Sci. - Biol. Sci.* 38, 131–138. <https://doi.org/10.4025/actascibiolsci.v38i2.30656>
- McMahon, K.W., Berumen, M.L., Thorrold, S.R., 2012. Linking habitat mosaics and connectivity in a coral reef seascape. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 109, 15372–15376. <https://doi.org/10.1073/pnas.1206378109>

- Nasri, N.N.S., Aris, A.Z., Mohammad, K.N., Looi, L.J., Kim, K.-W., 2018. Bioaccumulation of heavy metals in maricultured fish, *Lates calcarifer* (Barramudi), *Lutjanus campechanus* (red snapper) and *Lutjanus griseus* (grey napper). *Chemosphere* 17, 1–37. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.187s>
- Nobre, P., Lemos, A.T., Giarolla, E., Camayo, R., Namikawa, L., Kampel, M., Rudorff, N., Bezerra, D.X., Lorenzetti, J., Gomes, J., DA SILVA, M.B., Lage, C.P.M., Paes, R.L., Beisl, C., Lobão, M.M., Bignelli, P.A., DE MOURA, N., Galvão, W.S., Polito, P.S., 2022. The 2019 northeast Brazil oil spill: scenarios. *An. Acad. Bras. Cienc.* 94, 1–23. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202220210391>
- Noël, L., Chekri, R., Millour, S., Merlo, M., Leblanc, J.C., Guérin, T., 2013. Distribution and relationships of As, Cd, Pb and Hg in freshwater fish from five French fishing areas. *Chemosphere* 90, 1900–1910. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.10.015>
- Oliveira, L.M., 2022. Distribuição de elementos traço em sedimentos superficiais do estuário Serinhaém, BA, após contaminação por óleo. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.
- Pan, B., Wang, Y., Li, D., Wang, T., Du, L., 2022. Tissue-specific distribution and bioaccumulation pattern of trace metals in fish species from the heavily sediment-laden Yellow River, China. *J. Hazard. Mater.* 425, 128050. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.128050>
- Peana, M., Medici, S., Dadar, M., Zoroddu, M.A., Pelucelli, A., Chasapis, C.T., Bjørklund, G., 2021. Environmental barium: potential exposure and health-hazards. *Arch. Toxicol.* 95, 2605–2612. <https://doi.org/10.1007/s00204-021-03049-5>
- Peña-Icart, M., Rodrigues Pereira-Filho, E., Lopes Fialho, L., Nóbrega, J.A., Alonso-Hernández, C., Bolaños-Alvarez, Y., Muñoz-Caravaca, A., Pomares-Alfonso, M.S., 2017. Study of macro and microelements in fish from the Cienfuegos Bay. Relationship with its content in sediments. *Environ. Monit. Assess.* 189. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6144-7>
- Pena, P.G.L., Northcross, A.L., Lima, M.A.G. de, Rêgo, R. de C.F., 2020. Derramamento de óleo bruto na costa brasileira em 2019: emergência em saúde pública em questão. *Cad. Saude Publica* 36, 1–6. <https://doi.org/10.1590/0102-311X00231019>
- Pereira, T. de S., 2014. Biodisponibilidade de metais no estuário do rio Paraguaçu, Baía de Todos os Santos, Bahia. Universidade Federal da Bahia.
- Qadir, A., Malik, R.N., 2011. Heavy Metals in Eight Edible Fish Species from Two Polluted Tributaries (Aik and Palkhu) of the River Chenab, Pakistan. *Biol. Trace Elem. Res.* 143, 1524–1540. <https://doi.org/10.1007/s12011-011-9011-3>
- Rangel, C.A., Chaves, L.D.C.T., Monteiro-neto, C., 2007. Baseline assessment of the reef fish assemblage from Cagarras archipelago, Rio de Janeiro, southeastern Brazil. *Brazilian J. Oceanogr.* 55, 7–17.
- Reis-Filho, J.A., Schmid, K., Harvey, E.S., Giarrizzo, T., 2019. Coastal fish assemblages reflect marine habitat connectivity and ontogenetic shifts in an estuary-bay-continental shelf gradient. *Mar. Environ. Res.* 148, 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2019.05.004>
- Repula, C.M.M., De Campos, B.K., Ganzarolli, E.M., Lopes, M.C., Quináia, S.P., 2012. Biomonitoramento de Cr e Pb em peixes de água doce. *Quim. Nov.* 35, 905–909.
- Santana, C.O., Jesus, T.B., Aguiar, W.M., Jesus Sant’anna Franca-Rocha, W., Soares, C.A.C., 2017. Assessment of health risk related to the ingestion of trace metals through fish consumption in Todos os Santos Bay. *Environ. Monit. Assess.* 189, 1–7. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5913-7>

- Shahjahan, M., Taslima, K., Rahman, M.S., Al-Emran, M., Alam, S.I., Faggio, C., 2022. Effects of heavy metals on fish physiology – A review. *Chemosphere* 300, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134519>
- Sheikhzadeh, H., Hamidian, A.H., 2021. Bioaccumulation of heavy metals in fish species of Iran: a review. *Environ. Geochem. Health* 43, 3749–3869. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10653-021-00883-5>
- Shi, C., Ding, H., Zan, Q., Li, R., 2019. Spatial variation and ecological risk assessment of heavy metals in mangrove sediments across China. *Mar. Pollut. Bull.* 143, 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.04.043>
- Silva, A.C. de F.S., Santana, C.O., Vergilio, C. dos S., Jesus, T.B., 2023. Distribution, toxicity and bioaccumulation of trace metals in environmental matrices of an estuary in a protected area. *Mar. Pollut. Bull.* 191, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114928>
- Silva, C.A., Garcia, C.A.B., Santana, H.L.P., Pontes, G.C., Wasserman, J.C., Costa, S.S.L., 2021. Metal and metalloid concentrations in marine fish marketed in Salvador, BA, northeastern Brazil, and associated human health risks. *Reg. Stud. Mar. Sci.* 43, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101716>
- Silva, C.A., Santos, S. de O., Garcia, C.A.B., Pontes, G.C., Wasserman, J.C., 2019. Metals and arsenic in marine fish commercialized in the NE Brazil: Risk to human health. *Hum. Ecol. Risk Assess.* 26, 1–18. <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1529552>
- Silva, D., Martins, K., Oliveira, J., da Silva, R., Sampaio, I., Schneider, H., Gomes, G., 2018. Genetic differentiation in populations of lane snapper (*Lutjanus synagris* – Lutjanidae) from Western Atlantic as revealed by multilocus analysis. *Fish. Res.* 198, 138–149. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2017.10.005>
- Silva, E., Costa, F.N., Souza, T.L., Viana, Z.C.V., Souza, A.S., Korn, M.G.A., Ferreira, S.L.C., 2016. Assessment of trace elements in tissues of fish species: multivariate study and safety evaluation. *J. Braz. Chem. Soc.* 27, 2234–2245. <https://doi.org/10.5935/0103-5053.20160116>
- Silva, L.S.C., Picanço, J. de L., Calil, J.G.S., 2020. O grande desastre esquecido: análise preliminar do derramamento de óleo na costa brasileira (agosto/2019 - março/2020) e seus impactos no litoral da Bahia. *Rev. da UFMG* 27, 54–79.
- Soares, E.C., Bispo, M.D., Vasconcelos, V.C., Soletti, J.I., Carvalho, S.H.V., de Oliveira, M.J., dos Santos, M.C., dos Santos Freire, E., Nogueira, A.S.P., da Silva Cunha, F.A., Sandes, R.D.D., dos Santos, R.A.R., Neta, M.T.S.L., Narain, N., Garcia, C.A.B., da Costa, S.S.L., Santos, J.C.C., 2021. Oil impact on the environment and aquatic organisms on the coasts of the states of Alagoas and Sergipe, Brazil - A preliminary evaluation. *Mar. Pollut. Bull.* 171, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112723>
- Soares, M.O., Teixeira, C.E.P., Bezerra, L.E.A., Rabelo, E.F., Castro, I.B., Cavalcante, R.M., 2022. The most extensive oil spill registered in tropical oceans (Brazil): the balance sheet of a disaster. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 29, 19869–19877. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18710-4>
- Soares MO, Rabelo EF (2023) Severe ecological impacts caused by one of the worst orphan oil spills worldwide. *Mar Environ Res* 187:1–8. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.105936>
- Souza-Araujo, J. de, Hussey, N.E., Hauser-Davis, R.A., Rosa, A.H., Lima, M. de O., Giarrizzo, T., 2022. Human risk assessment of toxic elements (As, Cd, Hg, Pb) in marine fish from the Amazon. *Chemosphere* 301, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134575>

- Squadrone, S., Brizio, P., Stella, C., Mantia, M., Favaro, L., Biancani, B., Gridelli, S., Da Rugna, C., Abete, M.C., 2020. Differential Bioaccumulation of Trace Elements and Rare Earth Elements in the Muscle, Kidneys, and Liver of the Invasive Indo-Pacific Lionfish (*Pterois* spp.) from Cuba. *Biol. Trace Elem. Res.* 196, 262–271. <https://doi.org/10.1007/s12011-019-01918-w>
- Taslina, K., Al-Emran, M., Rahman, M.S., Hasan, J., Ferdous, Z., Rohani, M.F., Shahjahan, M., 2022. Impacts of heavy metals on early development, growth and reproduction of fish – A review. *Toxicol. Reports* 9, 858–868. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2022.04.013>
- Thanigaivel, S., Vickram, S., Dey, N., Jeyanthi, P., Subbaiya, R., Kim, W., Govarthanan, M., Karmegam, N., 2023. Ecological disturbances and abundance of anthropogenic pollutants in the aquatic ecosystem: Critical review of impact assessment on the aquatic animals. *Chemosphere* 313, 1–11.
- Varol, M., Kaçar, E., Sünbül, M.R., Towfiqul Islam, A.R.M., 2022. Species, tissue and gender-related metal and element accumulation in fish species in a large reservoir (Turkey) and health risks and nutritional benefits for consumers. *Environ. Toxicol. Pharmacol.* 94, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2022.103929>
- Verma, A.K., Prakash, S., 2019. Impact of arsenic on haematology, condition factor, hepatosomatic and gastrosomatic index of a fresh water cat fish, *Mystus vittatus*. *Int. J. Biol. Sci.* 10, 49–54. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31567.10409>
- Viana, L.F., Kummrow, F., Cardoso, C.A.L., de Lima, N.A., do Amaral Crispim, B., Baruffatti, A., Florentino, A.C., 2023. Metal bioaccumulation in fish from the Araguari River (Amazon biome) and human health risks from fish consumption. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 30, 4111–4122. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22457-3>
- Viana, Z.C.V., Fernandes, G.B., Korn, M.G.A., Santos, L.C.S., 2012. ARTIGO ORIGINAL Estudo da absorção de elementos químicos no músculo de peixes do litoral da Bahia. *Rev. Ciências Médicas e Biológicas* 11, 27–34.
- Wang, J.-N., Zhao, Z.-M., Hu, G.-C., Zhong, S.X., Yao, L.-A., Ma, Q.-L., Xu, Z.-C., 2019. Distribution and Bioaccumulation Characteristics of Cadmium in Fish Species from the Longjiang River in the Guangxi Autonomous Region. *Huan Jing Ke Xue* 40, 488–495.
- Wang, Y., Lee, K., Liu, D., Guo, J., Han, Q., Liu, X., Zhang, J., 2020. Environmental impact and recovery of the Bohai Sea following the 2011 oil spill. *Environ. Pollut.* 263, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114343>
- Xu, X.W., Song, C.C., Tan, X.Y., Zhong, C.C., Luo, Z., 2023. Effects of dietary zinc (Zn) levels on growth performance, nutrient composition, muscle development, antioxidant and inflammatory responses in yellow catfish muscle. *Aquac. Reports* 31, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101640>
- Yang, L., Guo, M., Xin, C., Ren, X., Wang, L., Liu, Y., 2021. Comparison of trace element concentrations in freshwater fish and marine fish consumed in Shandong Province, China, and their potential risks to human health. *Mar. Pollut. Bull.* 165, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112114>
- Yi, Y.J., Zhang, S.H., 2012. Heavy metal (Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn) concentrations in seven fish species in relation to fish size and location along the Yangtze River. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 19, 3989–3996. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-0840-1>

CONCLUSÕES GERAIS

Os menores valores biométricos dos peixes foram registrados nas localidades mais críticas em relação à presença de óleo, seja a área de Madre de Deus, cronicamente afetada, para *Haemulon aurolineatum* (quatinga), ou em Tinharé-Boipeba, fortemente afetada pelo derrame no litoral para *Lutjanus synagris* (ariacó). Em ambas as espécies, os maiores valores dos índices fisiológicos foram observados na localidade menos afetada pelo óleo.

A concentração de alguns elementos químicos influenciou negativamente o crescimento total (As, Ba e Cr), o fator de condição (As, Ba e Zn) e o índice hepatossomático (As, Ba, Cr, Zn e Fe) dos peixes. As espécies apresentaram variação no tipo e na concentração metálica. Entre os metais que apresentaram diferenças na concentração entre as fases do ciclo de vida, os maiores valores foram observados nos peixes juvenis/ imaturos, sendo o fígado o principal órgão bioacumulador dos elementos químicos.

Apenas as populações de peixes em Madre de Deus apresentaram contaminação por Pb, enquanto as concentrações de As nas três áreas foram acima ou próximas do valor máximo aceitável pela Anvisa, o que indica potenciais riscos à saúde humana através do consumo das espécies de peixes avaliadas. Dessa forma, sugere-se que o derramamento de óleo pode ter impactado diferentemente as espécies, com seus efeitos estendendo-se aos organismos de áreas com menor registro de óleo. Contudo, em ambas as espécies, para a maioria dos metais, as concentrações se destacaram nos peixes em Madre de Deus, indicando que, o distúrbio crônico venha contribuindo mais para a bioacumulação do que o derrame do óleo de 2019.

Portanto, podemos concluir que houve variações na estrutura populacional dos peixes de ambientes afetados pelo óleo, e que a contaminação química pode ter contribuído com seus efeitos deletérios, para essas diferenças, visto que alguns elementos químicos influenciaram negativamente os aspectos populacionais analisados. Dessa forma, esse estudo evidenciou a relação entre os aspectos populacionais e a bioacumulação dos elementos químicos nos peixes, tendo o distúrbio do óleo contribuído para os padrões observados.