



**Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras**

Monografia para Obtenção do Grau de Licenciatura em Biologia Marinha

**Influência das variáveis ambientais na redistribuição dos juvenis de atum de barbatana amarela (*Thunnus albacares*) no nordeste do Oceano Índico.**

Autor:

Aldon Sérgio Tivane



**Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras**

Monografia para Obtenção do Grau de Licenciatura em Biologia Marinha

**Influência das variáveis ambientais na redistribuição dos juvenis de atum de barbatana amarela (*Thunnus albacares*) no nordeste do Oceano Índico.**

**Autor**

Aldon Sérgio Tivane

*Aldon Sérgio Tivane*

**Supervisor**

Doutor Anildo Naftal Nataniel

*Anildo Naftal*

**Avaliador**

Mestre Bonifácio Carlitos Manuessa

*Bonifácio Carlitos Manuessa*

**Presidente de Mesa**

Dr. Stélio Mangué

*Stelio Mangué*

Quelimane, Agosto de 2025

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho:

Ao meu pai **Sérgio Alberto Tivane**, que sempre dizia pra mim e aos meus irmãos, “*Enquanto eu ainda estiver vivo, nada de mal vai acontecer com vocês*”.

Ao meu primo **Guelton Pedzisai Shava**, por ter sido uma grande fonte de inspiração, *i got you my boy*.

Aos meus irmãos: Façam o melhor, sei que vocês tomarão melhores decisões que o vosso mano aqui.

## **Agradecimentos**

Agradeço à Deus acima de tudo por sempre ter me guiado e colocado pessoas certas sempre ao meu redor, nos momentos felizes e tristes, nos fracassos e vitórias e na realização deste sonho. Endereço profundos agradecimentos ao meu supervisor Dr. Anildo Naftal Nataniel que deu seu apoio incansável e incondicional para a elaboração desta monografia, foi graças a ele que veio aquela força interna que me fez não desistir e nem se quer cogitar pular do barco.

Um forte agradecimento ao meu Pai Sérgio Alberto Tivane por sempre ter acreditado e confiado em mim, e ter me motivado sempre e me fez acreditar que isso sim é possível, a minha mãe Nostina Salomão Nuvunga que acreditou também desde a primeira viagem que fiz em 2020 para cidade Quelimane. Agradecer a minha família, aos meus irmãos pelas esperanças e expectativas que tem, de certa forma isso me encorajou bastante a fazer esse trabalho. Aos tios, tias, primos, primas e amigos.

Agradecer a todo pessoal que conviveu comigo na cidade de Quelimane, que de certa forma se tornou em família, que fizeram parte dessa jornada desde o início, e outros que fui conhecendo ao longo da jornada. Ao Rogério Ocomana que esteve comigo desde o inicio dessa jornada, a Manuela, um forte agradecimento ao Luís Alexandre Simbine por ter sido a pessoa que me indicou o caminho certo me libertando de todas possíveis distrações, Wílder Muchanga, Anderson Bernardo Machai companheiro da turma, João Pacule, Marvin Matavele, Nelson Junior, Euclides, Joice e José.

Um agradecimento especial a minha namorada Helena da Graça Zunguze, por ter estado do meu lado nesses últimos anos e ter me encorajado a prosseguir com a concretização desse objectivo.

Aos meus colegas do curso, Madalena Duarte, Zacarias Chepate, Loide Raquel, Belcia da Fiana, Sertorio Alela, Chelton Magalhães, Zulmira Arcângela, Oliveira Armando.

Aos docentes que me acolheram assim que cheguei em Quelimane, a Dra Sara Tembe, um forte agradecimento a Eng. Joana por ter me ajudado numa época bem difícil dessa jornada, agradecer também ao Dr. Daniel, a Dra Paula por dar aquele ponto final em todo esse progresso, Dr Manuessa e aos outros que me ajudaram a concretizar esse sonho.

À UEM-ESCMC pela oportunidade de realização do curso. Agradeço também à todos aqueles que indiretamente, me apoiaram de modo a concluir essa etapa.

### **Declaração de Honra**

Declaro por minha honra, que este trabalho de licenciatura nunca foi apresentado para obtenção de qualquer grau académico e que o mesmo constitui resultado do meu labor. Cada ideia trazida de outros trabalhos foi devidamente citada no texto e referenciada na página das bibliografias. Esta monografia é apresentada em cumprimento parcial dos requisitos de obtenção do grau de licenciatura em Biologia Marinha, na Universidade Eduardo Mondlane.

Quelimane, Julho de 2025

**Autor:**

Aldon Sérgio Tivane

---

(Aldon Sérgio Tivane)

## Resumo

Este estudo teve como objectivo principal avaliar os efeitos das variáveis ambientais na redistribuição dos juvenis de atum (*Thunnus albacares*) na região ocidental do oceano Índico. Para este estudo, foram utilizados dados de captura de rede de cerco do YFT obtidos na base de dados do Instituto Espanhol Oceanográfico (IEO), para o período de janeiro de 2005 a dezembro de 2013. Os dados das variáveis ambientais referente ao período em estudo de 2005-2013, foram adquiridos no site MyOcean-Copernicus EU consortium ([marine.copernicus.eu](http://marine.copernicus.eu)) no formato netCDF e foram extraídos usando códigos específicos do pacote netCDF4, tidyverse e lubridate e outras funcionalidades básicas do programa R, versão 4.3.1. Usou-se o modelo aditivo generalizado GAM através do método regressivo que consiste em ajustar todas as variáveis previamente disponíveis e eliminou-se uma variável de cada vez de acordo com o nível de significância ( $p$ -value  $< 0.05$ ). Posteriormente, foi usado o método “k-fold cross validation” para validar o GAM selecionado na área em estudo. As variáveis climáticas incluídas no modelo foram responsáveis por aproximadamente 33,2% da variação nas capturas de Atum de Barbatana Amarela (*Thunnus albacares*) no Nordeste do Oceano Índico. A avaliação do modelo, por meio de validação cruzada “k-fold”, indicou um desempenho satisfatório, com uma métrica de erro médio quadrático (RMSE) em torno de 0,6, uma correlação de Pearson ( $\rho$ ) de aproximadamente 0,47 e um índice de similaridade (D) de 0,83. De acordo com os dados fornecidos, observou-se que a presença do atum está estreitamente relacionada às condições sazonais, com uma predominância no verão, especialmente nas latitudes mais ao norte, variando de (7°N a 12°N). Isso se traduz em taxas de captura relativamente mais elevadas durante esta estação, enquanto nas latitudes centrais e meridionais (de -13°S a 2°N) as capturas foram significativamente mais baixas, especialmente durante os períodos de transição e inverno. Além disso, a análise das variáveis ambientais e os índices de captura da espécie estudada demonstraram que a produtividade primária e sazonalidade foram as variáveis que mais se destacaram, ou seja, as que mais influenciaram na redistribuição destes juvenis de atum. Este estudo pode contribuir de certa forma na melhoria de medidas de gestão e conservação desta espécie visto que o nosso modelo faz a previsão dos locais de maior ocorrência da espécie em correlação com as variáveis oceanográficas.

**Palavras chaves:** *Yellowfin tunna*, Nordeste do Oceano Índico, Modelo Aditivo Generalizado.

## **Abstract**

The main objective of this study was to investigate the effects of environmental variables on the redistribution of juvenile tuna (*Thunnus albacares*) in the western Indian Ocean. For this study, purse seine catch data from the YFT were obtained from the database of the Spanish Oceanographic Institute (IEO) for the period from January 2005 to December 2013. Data on environmental variables for the 2005-2013 study period were acquired from the MyOcean-Copernicus EU consortium website ([marine.copernicus.eu](http://marine.copernicus.eu)) in netCDF format and were extracted using specific codes from the netCDF4, tidyverse, and lubridate packages, as well as other basic functionalities of the R program, version 4.3.1. The generalized additive GAM model was used through the regression method, which consists of adjusting all previously available variables and eliminating one variable at a time according to the significance level ( $p$ -value  $<0.05$ ). Subsequently, the  $k$ -fold cross-validation method was used to validate the selected GAM in the study area. The climatic variables included in the model accounted for approximately 33.2% of the variation in yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) catches in the Northeastern Indian Ocean. The model evaluation, using  $k$ -fold cross-validation, indicated satisfactory performance, with a root mean square error (RMSE) metric of approximately 0.6, a Pearson correlation ( $\rho$ ) of approximately 0.47, and a similarity index ( $D$ ) of 0.83. According to the data provided, tuna presence was closely related to seasonal conditions, with a predominance in summer, especially in the northernmost latitudes ( $7^{\circ}\text{N}$  to  $12^{\circ}\text{N}$ ). This translates into relatively higher catch rates during this season, while in central and southern latitudes (from  $-13^{\circ}\text{S}$  to  $2^{\circ}\text{N}$ ), catches were significantly lower, especially during the transition and winter periods. Furthermore, the analysis of environmental variables and catch rates for the studied species demonstrated that primary productivity and seasonality were the most prominent variables, that is, those that most influenced the redistribution of these juvenile tuna. This study may contribute to improving management and conservation measures for this species, as our model predicts the locations of greatest occurrence of the species in correlation with oceanographic variables.

**Keywords:** Yellowfin tuna, Northeastern Indian Ocean, Generalized Additive Model.

## Lista de figuras

Figura 1: Yellowfin Tuna ( <i>Thunnus albacares</i> ). Fonte: FAO (2002a) .....	5
Figura 2 Mapa da área de estudo. Distribuição da espécie Yellowfin tuna no nordeste do oceano indico ocidental na época de 2005 a 2013. Os pontos amarelos indicam os locais de ocorrência do atum.....	10
Figura 3. Ilustração da distribuição espaço-temporal do Yellowfin tuna (a). Efeitos dos fatores ambientais nas capturas no Nordeste do Oceano Índico Ocidental (b). O eixo-x representa as covariáveis selecionadas pelo modelo e o eixo-y designada por $f(x)$ , representa o grau de significância das covariáveis preditoras selecionadas pelo modelo. As linhas tracejadas na figura indicam os intervalos de confiança inferior e superior a 95%. As marcas pretas no eixo X indicam as observações.....	18

## Lista de tabela

**Tabela 1.** Resultados estatísticos do Modelo GAM selecionados para a preferência do habitat do atum de barbatana amarela no nordeste do oceano indico ocidental. O modelo foi ajustado com a distribuição Gaussiana com link de identidade. (Dev. Explicado) é o desvio explicado por todas as covariáveis no modelo, (GCV) critério de validação cruzada generalizada; (EDF) graus de liberdade efetivos, (n) unidades experimentais; Critério de Informação (AIC) Akaike, (Vo) velocidade das correntes da componente norte; anomalia do ph (Ph), temperatura superficial do mar (SST); e altura superficial do mar (SSH), clorofila-a (CHL) fitoplâncton (PHY), (RMSE) erro quadrático médio, mês (MONTH); ano (YEAR). Dev. Covariável: é o desvio explicado por cada termo covariável no modelo. F- Estatístico: dá a razão entre o desvio explicado e não explicado pela covariável..... 15

## Lista de abreviaturas

AIC	Akaike Information Criterion
D	Índice de Similaridade
Dev. Expl	Desvio Explicado
EDF	Grau de Liberdade Estimado
FAO	Food Alimentation Organization
GAM	Generalized Additive Model
RMSE	Erro dos Mínimos Quadrados
SSH	Sea Surface Height
SST	Sea Surface Temperature
Uo	Velocidade das correntes no sentido Este
Vo	Velocidade das correntes no sentido Norte
YFT	Yellowfin tuna
° C	Graus Celsius

## Índice

Dedicatória.....	I
Agradecimentos .....	II
Declaração de Honra.....	III
Resumo .....	IV
Abstract.....	V
Lista de figuras.....	VI
Lista de tabela .....	VII
Lista de abreviaturas .....	VIII
1. Introdução.....	1
1.1. Problemática e Justificativa .....	2
1.1.1. Problemática .....	2
1.1.2. Justificativa.....	3
1.2. Objectivos .....	4
1.2.1. Geral: .....	4
1.2.2. Específicos:.....	4
2. Referencial teórico.....	5
2.1. Biologia da espécie.....	5
2.1.1. Taxonomia do YFT .....	5
2.1.2. Ecologia.....	6
2.1.3. Distribuição e habitat .....	6
2.1.4. Reprodução.....	7
2.2. Modelos de distribuição de espécies.....	8
2.3. Modelos Aditivos Generalizados (GAM) .....	9
3. Metodologia.....	10

3.1. Área de estudo.....	10
3.2. Dados de captura .....	11
3.3. Dados ambientais .....	11
3.5. Construção e ajuste do modelo .....	12
4. Resultados.....	14
4.1. Validação do modelo.....	14
4.2. Efeitos das Variáveis Ambientais nas Capturas de <i>Thunnus albacares</i> .....	16
5. Discussão .....	19
5.1. Efeitos das Variáveis Ambientais na Redistribuição de juvenis de <i>Thunnus albacares</i> .....	20
6. Conclusões.....	23
7. Recomendações .....	24
8. Referências .....	25

## **1. Introdução**

As mudanças nas condições oceanográficas têm um impacto significativo em todos ecossistemas marinhos, nos níveis tróficos das espécies e nos aspectos socioeconômicos das nações. Vários estudos têm demonstrado o efeito das mudanças climáticas na distribuição e abundância das espécies marinhas, que transcendem para o bem-estar dos seres humanos e para a economia dos países (Cossa, 2023). Toda espécie possui níveis de tolerância às variáveis ambientais, os quais determinam o seu padrão de distribuição (Hazin, 1997), hábitos alimentares (Vayghan, et al., 2020a), nível de recrutamento anual e a reprodução (McKechnie, Hampton, Pilling, & N., 2016) na medida em que a mesma tende a procurar o conjunto de variáveis que mais se aproximam da sua faixa ótima. Nesse caso, é crucial a compreensão da relação existente entre as variáveis ambientais e os índices de captura de uma determinada espécie. Pois, pode constituir um instrumento bastante útil para a exploração, gestão e conservação do recurso.

Os atuns são recursos migratórios, ocorrendo em áreas tropicais e subtropicais nos três oceanos. O Oceano Índico contribui com cerca de 19% das capturas totais do atum em todo o mundo (ISSF, 2020), dentre as principais espécies com maior valor comercial estão presentes os atuns, como, skipjack (*Katsuwonus pelamis*), atum de barbatana amarela (*Thunnus albacares*), bigeye (*Thunnus obesus*) (Ribeiro, 2010). Estes atuns tem um potencial valor no mercado e um preço bastante alto que contribui na renda dos pescadores (Baso & Nelwan, 2017), daí que uma compreensão da distribuição desta espécie em estudo, ajudaria a formular uma estratégia para uma ótima exploração (Lakshadweep & Sea, 2020).

De acordo com estudos recentes (Lan, 2012; Pecoraro et al., 2016), a distribuição dos atuns tropicais está a mudar rapidamente devido às alterações na temperatura superficial do mar e à variabilidade nas correntes oceânicas. O presente trabalho pretende analisar a influência das variáveis ambientais na redistribuição de juvenis de atum de barbatana amarela *Thunnus albacares* no nordeste do oceano indico, a partir do período de referência de estudo (janeiro de 2005 – dezembro de 2013), tendo em conta as variáveis físicas e biogeoquímicas. O estudo vai contribuir com informações técnicas e científicas aos armadores de pesca e tomadores de decisão no direcionamento de ações operacionais para áreas específicas, de forma a permitir a conservação e exploração sustentável do YFT.

## **1.1. Problemática e Justificativa**

### **1.1.1. Problemática**

Os atuns representam um grupo de animais marinhos que enfrentam sérias ameaças à sua sobrevivência, sendo notadamente vulneráveis a diversos factores, incluindo as alterações nas condições ambientais e a atividade pesqueira intensa. As alterações climáticas são reconhecidas como uma das principais ameaças à biodiversidade marinha, particularmente para espécies altamente migratórias como o atum em estudo YFT, *Thunnus albacares*. Sua sensibilidade a mudanças nas condições oceanográficas pode levar a profundas alterações em seus padrões de distribuição, afetando não apenas a ecologia da espécie, mas também a sustentabilidade das pescarias que dela dependem.

Ademais, as alterações climáticas têm causado mudanças significativas na distribuição e captura de muitas espécies marinhas, como o atum. Pesquisas (Ashle et al., 2018; Chassot et al., 2019; Dueri et al., 2014; Nataniel et al., 2021) destacam que o aumento da temperatura da superfície do mar, a acidificação dos oceanos, a desoxigenação e a elevação do nível do mar estão modificando os habitats marinhos. Esses fatores, aliados às modificações nos padrões de ventos e correntes marítimas, podem impactar profundamente a disponibilidade de alimentos e a realocação de espécies migratórias, como o YFT no nordeste do Oceano Índico.

**Pergunta de Pesquisa:** Até que ponto as variáveis ambientais influenciam na redistribuição e capturas sazonais de Juvenis de Atuns *Thunnus albacares*, no nordeste do Oceano Índico?

### **1.1.2. Justificativa**

As alterações climáticas representam uma ameaça crescente à estabilidade dos ecossistemas marinhos, comprometendo serviços ecossistêmicos cruciais, como a pesca. O aumento da temperatura da superfície do mar, a acidificação dos oceanos, e as modificações na salinidade e na circulação oceânica impulsionam a redistribuição de espécies marinhas (Cheung et al., 2010; Brander, 2019), com implicações diretas na segurança alimentar e na economia local de comunidades costeiras.

Espécies altamente migratórias, como o atum Yellowfin (*Thunnus albacares*), são particularmente susceptíveis a estas mudanças, especialmente durante os seus estágios juvenis, que são mais vulneráveis a variáveis ambientais (Pecoraro et al., 2016; Nóbrega et al., 2022). A redistribuição dos juvenis pode impactar as capturas tradicionais, afectando directamente a sustentabilidade da pesca e a resiliência socioeconômica das comunidades dependentes.

O nordeste do Oceano Índico, uma região caracterizada pela forte influência de monções sazonais e consequentes variações nas condições hidrográficas, tem sido identificado como um *hotspot* de deslocamento de espécies pelágicas, evidenciando a sua sensibilidade aos efeitos das alterações climáticas. Apesar da relevância do tema, existe uma lacuna de estudos quantitativos que investiguem a influência de variáveis ambientais na distribuição de juvenis de *T. albacares* nesta região específica.

Este estudo visa preencher essa lacuna, empregando modelos preditivos, como (GAM), para mapear padrões espaciais e sazonais na distribuição de juvenis *T. albacares* em resposta a variáveis ambientais. Os resultados vão contribuir com conhecimento científico para subsidiar decisões de gestão pesqueira e estratégias de conservação, visando a sustentabilidade dos recursos pesqueiros e o fortalecimento da resiliência das comunidades em face das intensas transformações climáticas.

**Influência das variáveis ambientais na redistribuição dos juvenis de atum de barbatana amarela (*Thunnus albacares*) no nordeste do Oceano Índico.**

## **1.2. Objectivos**

### **1.2.1. Geral:**

- ✓ Avaliar o efeito das variáveis ambientais na redistribuição dos juvenis de atum (*Thunnus albacares*) no nordeste do Oceano Índico.

### **1.2.2. Específicos:**

- ✓ Descrever a distribuição espacial e sazonal dos juvenis de *Yellowfin tunna*;
- ✓ Simular o modelo preditivo de redistribuição dos juvenis de *Yellowfin tunna*.

**Influência das variáveis ambientais na redistribuição dos juvenis de atum de barbatana amarela (*Thunnus albacares*) no nordeste do Oceano Índico.**

## **2. Referencial teórico**

### **2.2. Biologia da espécie**

O atum albacora (*Thunnus albacares*) é uma espécie do Reino Animália. O atum albacora foi nomeado *Thunnus albacares* em 1788 por Pierre Bonnaterre e é uma das oito espécies do gênero *Thunnus*, que por sua vez é um dos cinco gêneros que formam a tribo Thunnini (conhecidas coletivamente como atuns).

#### **2.1.1. Taxonomia do YFT**

Filo: Chordata

Subfilo: Vertebrata

Classe: Osteichthyes

Subclasse: Actinopterygii

Ordem: Perciformes

Família: Scombridae

Tribo: Thunnini

Gênero: *Thunnus*

Espécie: *Thunnus albacares* Fonte : (Linneus, 1998).



**Figura 1:** Yellowfin Tuna (*Thunnus albacares*). Fonte: FAO (2002a)

### **2.1.2. Ecologia**

Segundo (Roger, 1994), os atuns são predadores oportunistas que se situam no topo das cadeias alimentares curtas. Possuem uma dieta variada que inclui crustáceos, peixes, cefalópodes e organismos gelatinosos (Potier et al., 2004).

Acredita-se que as presas preferidas no Oceano Índico incluam o nomídeo *Cubiceps pauciradiatus*, bem como o caranguejo nadador *Charybdis smithii* (Potier et al., 2004, Zudaire, et al., 2015).

De acordo com (Vaske-Júnior et al., 2003), acredita-se que o atum albacora (YFT) se alimenta principalmente durante o dia (exibindo níveis *de* atividade mais elevados entre o nascer e o pôr do sol), mas também foi relatado que se alimenta à noite.

### **2.1.3. Distribuição e habitat**

O atum albacora está distribuído principalmente nas águas oceânicas tropicais e subtropicais dos três principais oceanos onde forma grandes cardumes, muitas vezes associados a objetos flutuantes (Chassot et al. 2015). Essa ampla distribuição distribuída é influenciada por fatores como temperatura da água, salinidade e disponibilidade de alimentos, que são cruciais para o seu desenvolvimento e reprodução. O habitat preferencial do atum albacora inclui águas abertas e profundas, geralmente associadas a estruturas oceânicas como montes submarinos, ilhas e objetos flutuantes, que servem como pontos de agregação para presas, como pequenos peixes e lulas (Santos & Andrade, 2010). Os dados de captura com palangre indicam que o atum albacora está distribuído por todo o Oceano Índico tropical.

A marcação de arquivo do atum albacora mostrou que esta espécie pode mergulhar muito fundo (mais de 1000 m), provavelmente para se alimentar de presas meso pelágicas, mas passa a maior parte do tempo no topo da termoclina, onde a produção de fitoplâncton é maior e, portanto, as espécies de presas epipelágicas são mais concentradas (Schaefer et al. 2009).

A temperatura do mar é considerada um factor muito importante que limita a distribuição espacial e os movimentos verticais do atum albacora, uma vez que abaixo dos 15°C eles são incapazes de controlar os seus batimentos cardíacos, resultando numa redução do débito cardíaco

## **Influência das variáveis ambientais na redistribuição dos juvenis de atum de barbatana amarela (*Thunnus albacares*) no nordeste do Oceano Índico.**

que explica por que mergulham diariamente em vez de passar longos períodos de tempo em profundidade (Brill & Bushnell, 2001).

De acordo com Reglero et al. (2014), pensa-se que as condições ambientais e oceanográficas locais influenciam mais a distribuição e a sobrevivência do atum albacora nas primeiras fases da vida do que dos adultos, devido às capacidades endotérmicas que são adquiridas durante estas fases, para as quais são necessárias certas condições, o que significa que a sua gama de habitats é muito maior.

### **2.1.4. Reprodução**

O atum albacora é conhecido por sua capacidade de se reproduzir em uma variedade de habitats dentro de ambientes tropicais e subtropicais. Estudos indicam que a espécie pode se reproduzir ao longo de quase todo o ano, dependendo das condições ambientais, como temperatura da superfície do mar (SST) e disponibilidade de nutrientes (Nóbrega, et al., 2022 & Shi, et al., 2022). Em particular, áreas com SST entre 28 e 29°C e concentrações elevadas de clorofila (Chla) são consideradas favoráveis para a desova, pois proporcionam um ambiente propício para o desenvolvimento de larvas e juvenis (Nóbrega, Lira, & Oliveira, 2022).

A migração do atum albacora é um fenômeno notável, com indivíduos se deslocando em busca de locais de desova adequados. As evidências sugerem que, enquanto algumas espécies de atum, como o atum azul do Atlântico (*Thunnus thynnus*), realizam migrações de longa distância para alcançar locais de desova específicos, o atum albacora tende a se reproduzir em uma gama mais ampla de habitats, refletindo sua adaptabilidade a diferentes condições ambientais (Dickson & Dickson, 2019; Pecoraro, et al., 2016). Essa flexibilidade reprodutiva pode ser uma vantagem em um ambiente marinho em constante mudança, onde fatores como a temperatura e a produtividade primária podem variar significativamente.

Além das condições ambientais, a estrutura da população e a dinâmica de reprodução do atum albacora também são influenciadas por fatores biológicos e ecológicos. A maturidade sexual dos indivíduos é alcançada em idades relativamente jovens, o que contribui para a capacidade da espécie de se reproduzir em grandes quantidades (Shi, et al., 2022; Pecoraro, et al., 2017).

A fecundidade do atum albacora é alta, com fêmeas capazes de liberar milhões de ovos durante a temporada de desova, o que aumenta as chances de sobrevivência das larvas em um ambiente

## **Influência das variáveis ambientais na redistribuição dos juvenis de atum de barbatana amarela (*Thunnus albacares*) no nordeste do Oceano Índico.**

competitivo (Shi, et al., 2022; Pecoraro, et al., 2016). Estudos recentes também indicam que a variabilidade espacial e temporal na biologia reprodutiva do atum albacora pode ser significativa, com diferenças observadas entre populações em diferentes regiões do Oceano Pacífico e Índico (Schaefer & Fuller, 2022)

A biologia reprodutiva do atum albacora é definida por um padrão de reprodução sexuada, onde a fertilização ocorre externamente. Estudos indicam que a reprodução do atum albacora se dá em águas quentes, geralmente em áreas de alta produtividade, onde a temperatura da água e a disponibilidade de alimento são adequados (Santos & Andrade, 2010).

O atum albacora é uma espécie iterópara, gonocórica e ovípara (Pecoraro, et al., 2017). Esta espécie realiza importantes migrações tróficas e reprodutivas em seu ciclo de vida. A desova ocorre exclusivamente à noite e depende da temperatura (Schaefer 1998).

A fertilização é externa e a desova ocorre em águas superficiais. Após a fertilização, os ovos eclodem rapidamente e começa a fase larval planctônica. Os ovos são pelágicos, esféricos, transparentes e flutuantes. Os adultos são predadores ativos, alimentando-se de espécies pelágicas e epipelágicas de peixes e lulas (Santos & Andrade, 2010).

### **2.3. Modelos de distribuição de espécies**

Os MDEs são baseados, principalmente, nas condições ambientais e são gerados a partir de um conjunto de regras que vão desde soluções matemáticas mais simples (exemplo: Distância Euclidiana e BIOCLIM), passando por ajustes estatísticos (exemplo: Modelos Lineares Generalizados – GLM, Modelos Aditivos Generalizados – GAM) até algoritmos derivados de inteligência artificial (exemplo: Maxent, GARP, Redes Neurais). Basicamente, o que estes algoritmos calculam é a similaridade ambiental entre os locais de ocorrência conhecidos para a espécie e outras regiões ainda desconhecidas (Nhantumbo, 2024), atribuindo maior probabilidade de ocorrência da espécie aqueles locais de maior similaridade ambiental (Franklin, 2009). Com esta informação, podemos restringir áreas de pesca ou auxiliar no planejamento e na seleção de reservas marinhas (Klippel, 2016).

É importante gerar, de maneira rápida e eficiente, novas informações sobre suas distribuições geográficas e sobre o status de suas populações (Paglia, Koch, & De Rezende, 2012). Entretanto, o modelo GAM (Wood, 2006) tem sido aplicado para prever a distribuição das espécies, devido

**Influência das variáveis ambientais na redistribuição dos juvenis de atum de barbatana amarela (*Thunnus albacares*) no nordeste do Oceano Índico.**

a sua flexibilidade em modelar relações lineares e não lineares incluindo variáveis categóricas (Hastie, & Friedemann, 2009).

#### **2.4. Modelos Aditivos Generalizados (GAM)**

Os GAM's são considerados ideais para descrever as relações ecológicas como é o caso das variáveis deste estudo (Guisan et al., 2002). Um GAM, utiliza uma função de link para estabelecer uma ligação entre a média da variável resposta e uma função suavizada da variável explicita. Estes modelos estatísticos o seu poder está em sua habilidade em lidar com relações não lineares entre uma variável resposta e uma série de variáveis explicativas (Wood, 2006). A modelagem ecológica tem como propósito crucial dar bases matemáticas para interpretação destas relações, examinando parâmetros e indicando as contribuições de cada variável sobre a variável de interesse (Yee & Mitchell, 1991).

Este modelo pode ser escrito da seguinte forma (Dallazuanna & Bonat, 2007)

$$g(\mu_i) = \theta + f_1x_{1i} + f_2x_{2i} + f_3x_{3i} + \dots$$

Onde:

$g(\mu_i)$  É a função de ligação (*link function*);

$x_i$  é uma coluna da matriz do modelo para uma dada covariável;

$\theta$  é o vetor do parâmetro correspondente e;

$f_i$  são as funções suaves das co variáveis.

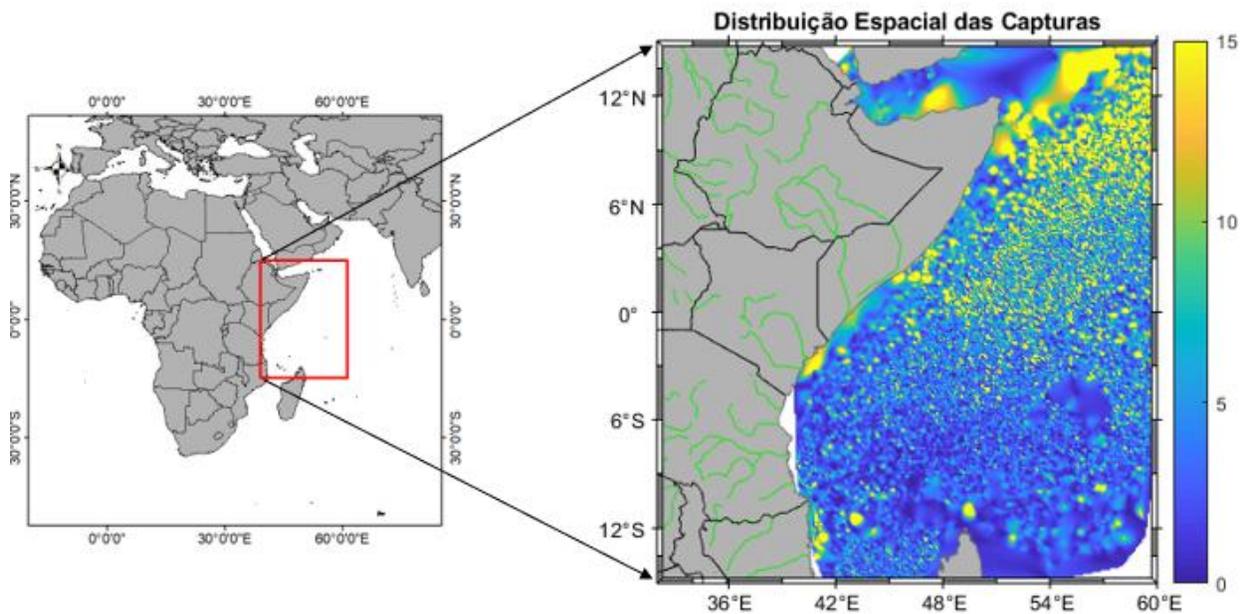
**Influência das variáveis ambientais na redistribuição dos juvenis de atum de barbatana amarela (*Thunnus albacares*) no nordeste do Oceano Índico.**

### 3. Metodologia

#### 3.2. Área de estudo

A área de estudo localiza-se nas latitudes  $-15^{\circ}$  a  $15^{\circ}$  e longitude:  $40^{\circ}$  a  $60^{\circ}$  no norte do oceano Índico ocidental. Nesta área dominam duas correntes principais que são reversas no oceano aberto, a Corrente de Monção de Verão (SMC) e a Corrente de Monção de Inverno (WMC). Durante o inverno (Maio a Agosto), a corrente das monções flui para o leste como uma corrente contínua do oeste do Mar da Arábia até a Baía de Bengala; Durante o verão (Novembro a Março), flui para o oeste, desde o limite leste da baía até o oeste do Mar arábico (Shankar et al., 2002). Essas duas correntes transferem massas de água nos dois braços do norte do oceano Índico e provocam uma ressurgência costeira na costa da Somália que reduz consideravelmente a temperatura superficial do mar durante a monção do verão (Schott, 1983).

Na sequência do transporte de Ekman e com a monção de sudoeste a soprar paralelamente à costa da Somália, a direção do upwelling é para o mar durante o verão. (Matthias et al., 2006). Os ventos de monção do nordeste afectam largamente o período de Dezembro a Fevereiro e a monção do sudeste (ventos alísios), de Abril a Setembro. (Lutjeharms & Town, 2006).



**Figura 2:** Mapa da área de estudo. Distribuição da espécie Yellowfin tuna no nordeste do oceano Índico ocidental na época de 2005 a 2013. Os pontos amarelos indicam os locais de ocorrência ou com maior abundância do atum.

### **3.3. Dados de captura**

Para este estudo, foram utilizados dados de captura de rede de cerco do YFT obtidos na base de dados do Instituto Espanhol Oceanográfico (IEO), para o período de janeiro de 2005 a dezembro de 2013. Os dados foram da pescaria de rede de cerco (captura superficial do atum) através dos métodos de dispositivos de tração de cardumes (FAD) assim como tecnologias de pesca livre dos cardumes de atum (FSC) com informações sobre a composição das capturas, horas de pesca e que apresentam melhor resolução mensal, latitude e longitude.

### **3.4. Dados ambientais**

Os dados das variáveis ambientais referente ao período em estudo de 2005-2013, foram adquiridos no site MyOcean-Copernicus EU consortium ([marine.copernicus.eu](http://marine.copernicus.eu)) no formato netCDF e foram extraídos usando códigos específicos do pacote netCDF4 (Pierce, 2017), tidyverse e lubridate (Grolemund & Wickham, 2011) e outras funcionalidades básicas do programa R, versão 4.3.1. (R Core Team, 2023). Os dados físicos foram extraídos do produto CMEMS GLOBAL\_REANALYSIS\_001\_030 e os biogeoquímicos do produto GLOBAL\_REANALYSIS\_BIO\_001\_029 com uma resolução espacial e temporal de  $1/4^\circ$  e mensal de  $1/4^\circ$ .

As variáveis físicas consideradas nas análises foram: a temperatura superficial do mar (SST;  $^\circ\text{C}$ ), altura da superfície do mar (SSH; m) e velocidade das correntes ( $V_o$  m/s); incluindo também, variáveis biogeoquímicas como, o pH, a clorofila-a (Chl-a;  $\text{mg}/\text{m}^{-3}$ ) e o fitoplâncton (phyc;  $\text{mmol}/\text{m}^{-3}$ ) devido a sua relevância na descrição de habitats para os atuns e pela capacidade de refletirem mudanças no clima (Zagaglia et al., 2004).

Em seguida, os dados de variáveis ambientais foram agrupados e ajustados com os dados de captura em função da longitude, latitude, ano e mês como médias mensais em uma grade espacial igual a  $1^\circ$  de resolução.

### **3.5. Análise de dados**

#### **3.5.1. Análise exploratória**

## **Influência das variáveis ambientais na redistribuição dos juvenis de atum de barbatana amarela (*Thunnus albacares*) no nordeste do Oceano Índico.**

Todas as análises estáticas foram realizadas no programa R versão 4.1.0 (R Core Team, 2021) e um nível de significância ( $\alpha$ ) de 0,05 foi definido para a modelagem.

O objetivo da análise exploratória é de examinar os dados previamente à aplicação de qualquer técnica estatística, para a identificação dos potenciais problemas ou erros nos dados, e entender melhor os padrões presentes nos dados, detetar desvios ou eventos anômalos, além de encontrar relações interessantes entre os variáveis preditores e a variável resposta. Para esta análise foi usado o ficheiro de dados no formato "csv" organizados em linhas de cada observação e colunas das variáveis selecionadas para estudo.

Uma ferramenta gráfica que normalmente é usada para deteção de valores discrepantes é o 'boxplot', que consiste em visualizar a mediana e a distribuição dos dados. Dependendo do software utilizado, a mediana é tipicamente apresentada como uma linha horizontal com os quartis de 25% e 75% formando uma caixa ao redor da mediana que contém metade das observações (Zuur et al., 2010). Os valores anormais detetados foram corrigidos para o melhor ajuste do modelo nas fases subsequentes.

De seguida foi feito o teste de correlação de Pearson, de modo a verificar o nível de correlação entre as variáveis explicativas. A correlação entre a variável preditor foi testada usando o índice de correlação de Pearson ( $r$ ), e as variáveis com um índice absoluto superior a 70% ( $-0,70 < r < +0,70$ ) uma das variáveis foi excluída na fase posterior do ajuste do modelo (Dormann, et al., 2013).

Posteriormente, foi testada a importância relativa das variáveis usando o pacote randomForest (Liaw & Matthew, 2002) para auxiliar na seleção das variáveis a incluir no modelo quando um par de variáveis fosse colinear. Por outro lado, o conhecimento ecológico das variáveis sobre as espécies é fundamental na escolha da variável a ser excluída ou incluída no modelo quando se verifica a correlação entre pares das variáveis (Zuur et al., 2010).

### **3.6. Construção e ajuste do modelo**

No presente estudo, para construção e ajuste do modelo, foi utilizado o GAM como um método típico de regressão não paramétrico para examinar os efeitos das variáveis ambientais na redistribuição de juvenis de atum albacora na redistribuição espacial e sazonal. Na estatística, GAM é um modelo linear generalizado no qual a variável resposta depende linearmente das

**Influência das variáveis ambientais na redistribuição dos juvenis de atum de barbatana amarela (*Thunnus albacares*) no nordeste do Oceano Índico.**

funções suaves de algumas variáveis preditoras. Desta feita avaliou-se a relação entre a variável dependente e as variáveis ambientais, adicionou-se uma função de suavização spline não-paramétrica, relacionada a série temporal, e o GAM foi ajustado com uma função “identity link” utilizando pacote estatístico mgcv (Wood, 2017). Este método já foi testado e comprovado em vários estudos para determinar o habitat preferencial ou de agregação da população e biomassa das espécies marinhas pelágicas e ou demersais.

A seleção das covariáveis significativas foi realizado com base em eliminação progressiva, isto significa que: foi eliminada uma de cada vez as variáveis previamente identificadas, no ajuste do modelo seguindo estes critérios: (i) se a variação explicativa não incluir zero em toda a faixa de confiança de 95%; (ii) a pontuação do Critério de Informação Akaike (AIC) e o o valor do “GVC-generalized cross-validation” reduzir com a eliminação da covariável não significativa, (iii) o desvio explicado mantiver se constante ou ilustrar melhoria no desempenho do modelo (iv) a inspeção gráfica dos residuais comprovar a normalidade, homogeneidade da variância e a linearidade entre os valores observados e modelados.

Visto que os dados originais não seguiam a distribuição normal, os dados tiveram que ser transformados para escala logarítmica e o modelo foi ajustado para atender aos critérios de normalidade da variável resposta (Underwood, 1997; Wood, 2006; Zuur et al., 2009). Para o ajuste usou-se o pacote mgvc (Wood, 2006) e as variáveis selecionados pelo GAM para caracterizar o habitat preferencial da espécie em estudo *Thunnus albacares* foram as que constam no seguinte modelo:

**Formula:**  $\log(YFT + 1) \sim \text{te}(x, y, \text{month}, k = c(50, 6), \text{bs} = c("ts", "cc"), d = c(2, 1)) +$   
 $s(\text{CHL}, \text{PHY}, k = 20, \text{bs} = "ts") + s(\text{SST}, k = 6, \text{bs} = "cs") +$   
 $s(\text{SSH}, k = 6, \text{bs} = "cs") + s(\text{PH}, k = 6, \text{bs} = "cs") + s(\text{VO}, k = 6, \text{bs} = "cs") + s(\text{year}, \text{bs} = "re")$

O “s” é a função suavizada do spline penalizado, para as interações simples e variáveis ambientais (C). As variáveis simples foram ajustadas com spline de regressão cúbica (cs) para modelar relacionamentos não lineares. O “cs” garante que um spline de regressão com encolhimento seja aplicado, um suavizador pode ter zero graus de liberdade e todos os suavizadores com zero graus de liberdade podem ser descartados simultaneamente do modelo

## **Influência das variáveis ambientais na redistribuição dos juvenis de atum de barbatana amarela (*Thunnus albacares*) no nordeste do Oceano Índico.**

(Zuur et al., 2009). A dimensão  $k$ , representando os graus máximos de liberdade para cada termo suave e, foi definida como  $k = 6$  através do “método de tentativa e erro”, para evitar o ajuste excessivo do modelo e para simplificar a interpretação dos resultado (Wikle et al., 2019).

Para avaliar e validar o desempenho do modelo foi aplicada a validação cruzada “k-fold” (James et al., 2014) e, a precisão e o desempenho preditivo do modelo foi verificada usando a média da raiz quadrada do erro (RMSE), a correlação de Pearson ( $\rho$ ) e o índice de similaridade de “D” de Schoener (Zhang, 2016). Quando o modelo foi finalmente validado, as variáveis significativas foram usadas para descrever ou caracterizar o habitat favorável dos juvenis do *yellowfin tunna* considerando as correlações dos predictores oceanográficos com agregação da biomassa.

## **4. Resultados**

### **4.2. Validação do modelo**

As variáveis ambientais incluídas no modelo foram responsáveis por aproximadamente 33,2% da variação nas capturas de juvenis de Atum em estudo, (*Thunnus albacares*) no Nordeste do Oceano Índico. A avaliação do modelo, por meio de validação cruzada "k-fold", indicou um desempenho satisfatório, com uma métrica de erro médio quadrático (RMSE) em torno de 0,6,

**Influência das variáveis ambientais na redistribuição dos juvenis de atum de barbatana amarela (*Thunnus albacares*) no nordeste do Oceano Índico.**

uma correlação de Pearson ( $\rho$ ) de aproximadamente 0,47 e um índice de similaridade (D) de 0,83, conforme apresentado na Tabela 1.

A Tabela 1 resume os parâmetros do modelo, incluindo os Graus de Liberdade Estimados (EDF), o Critério de Informação de Akaike (AIC) e a Validação Cruzada Generalizada (GCV). A importância de cada variável foi avaliada com base no desvio explicado e na significância estatística ( $p < 0,001$ ).

A produtividade primária (Chl x Phy) apresentaram um F-estatístico de cerca de 2,26, com 19% de desvio explicado e um EDF (Grau de Liberdade Estimado) de 15,86. A Temperatura Superficial do Mar (SST) mostrou um F- estatístico de 2,91, com desvio explicado de 5% e um EDF (Grau de Liberdade Estimado) de 3,39. Altura Superficial do Mar (SSH) teve um F-estatístico em torno de 1,99, explicando cerca de 5% da variação, com um EDF (Grau de Liberdade Estimado) de 4,53. Velocidade das Correntes da Componente Norte registrou um F-estatístico aproximado de 2,8, contribuindo também com cerca de 5% do desvio explicado, com um EDF (Grau de Liberdade Estimado) de 4,29.

Com base nos resultados obtidos, sugerem que as variáveis ambientais, especialmente a produtividade primária (Chl e o Phy) desempenham um papel significativo nas capturas do atum em estudo YFT, o que é relevante para a compreensão da dinâmica da pesca e da gestão dos recursos marinhos na região em estudo.

**Tabela 1.** Resultados estatísticos do Modelo GAM selecionados para a preferência do habitat do atum de barbatana amarela no nordeste do oceano indico ocidental. O modelo foi ajustado com a distribuição Gaussiana com link de identidade. (Dev. Explicado) é o desvio explicado por todas as covariáveis no modelo, (GCV) critério de validação cruzada generalizada; (EDF) graus de liberdade efetivos, (n) unidades experimentais; Critério de Informação (AIC) Akaike, (Vo) velocidade das correntes da componente norte; anomalia do ph (Ph), temperatura superficial do mar (SST); e altura superficial do mar (SSH), clorofila-a (CHL) fitoplâncton (PHY), (RMSE) erro quadrático médio, mês (MONTH); ano (YEAR). Dev. Covariável: é o desvio explicado por cada termo covariável no modelo. F- Estatístico: dê a razão entre o desvio explicado e não explicado pela covariável.

**Influência das variáveis ambientais na redistribuição dos juvenis de atum de barbatana amarela (*Thunnus albacares*) no nordeste do Oceano Índico.**

Parâmetros	Modelo ajustado com Gaussian Family Identity Link			
<b>R2 ajustado</b>	0.293			
<b>Dev. Explicado (%)</b>	33.2%			
<b>AIC</b>	3847.19			
<b>GCV</b>	0.37			
<b>n</b>	2087			
<b>Rho</b>	0.47			
<b>EDF</b>	116.08			
<b>DF. Residual</b>	1970.92			
<b>Shonn Index D</b>	0.83			
<b>RMSE</b>	0.6			

Covariates	EDF	P-Value	Dev. Covariável	F-estatístico
<b>Month</b>	83.29	<0,001	249	1.49
<b>CHL X PHY</b>	15.86	<0,001	19	2.26
<b>SST</b>	3.39	<0,001	5	2.91
<b>SSh</b>	4.53	<0,001	5	1.99
<b>Ph</b>	3.64	<0,001	5	2.22
<b>Vo</b>	4.29	<0,001	5	2.48
<b>Year</b>	0.05	<0,001	1	1.76

### 4.3. Efeitos das Variáveis Ambientais nas Capturas de *Thunnus albacares*

Os resultados apresentados revelam uma análise detalhada sobre a influência de variáveis ambientais na redistribuição de juvenis do atum de barbatana amarela (*Thunnus albacares*) no nordeste do Oceano Índico. De acordo com os dados fornecidos, observou-se que a presença do atum está estreitamente relacionada às condições sazonais, com uma predominância no verão,

**Influência das variáveis ambientais na redistribuição dos juvenis de atum de barbatana amarela (*Thunnus albacares*) no nordeste do Oceano Índico.**

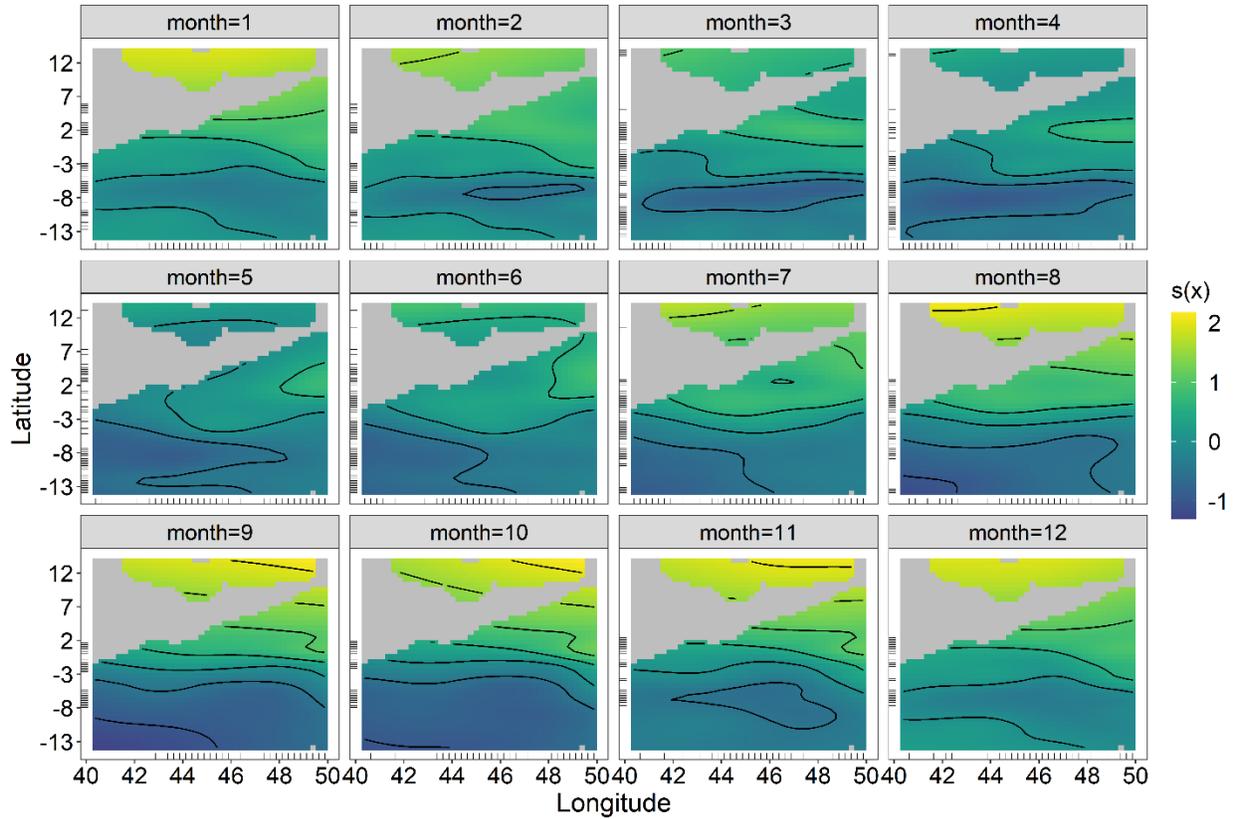
especialmente nas latitudes mais ao norte, variando de 7°N a 12°N. Isso se traduz em taxas de captura relativamente mais elevadas durante esta estação, enquanto nas latitudes centrais e meridionais (de -13°S a 2°N) as capturas foram significativamente mais baixas, especialmente durante os períodos de transição e inverno.

Além disso, a análise das variáveis ambientais indicou que a temperatura da superfície do mar (SST) foi a mais influente, o que sugere que fatores térmicos desempenham um papel crítico na distribuição e abundância dessa espécie. O pH da água foi a segunda variável mais relevante, indicando que os juvenis do atum em estudo YFT, preferem águas com pH entre 8,2 e 8,4.

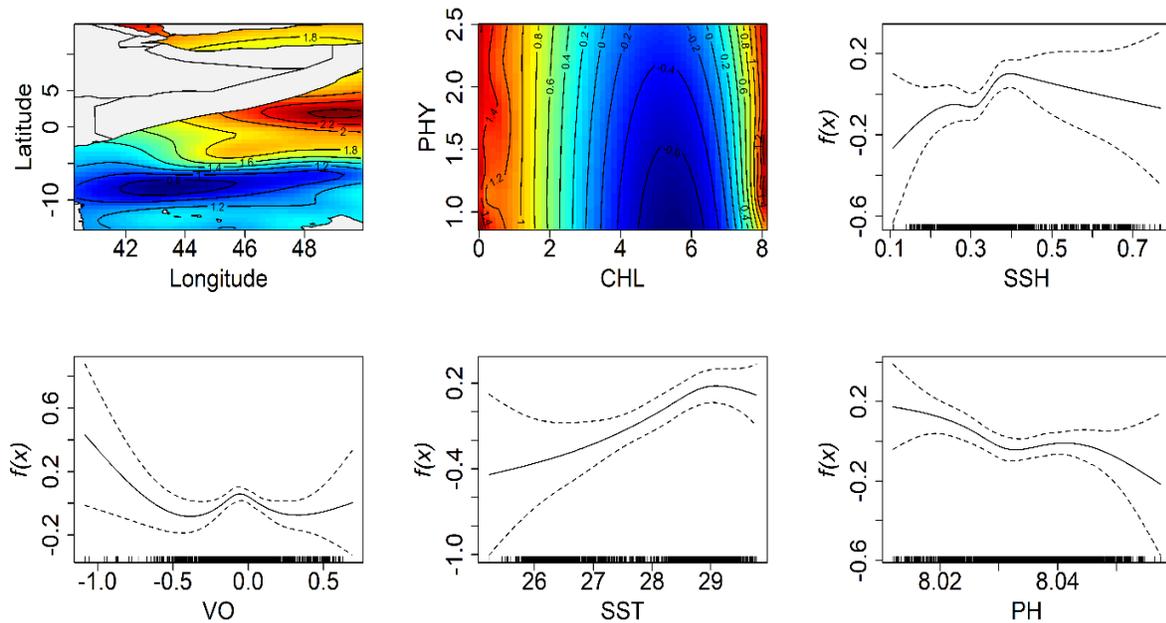
E por fim, a relação entre os juvenis desse atum e a dinâmica das correntes e da altura superficial do mar (SSH) foi observada como uma correlação positiva fraca. A presença do atum é mais abundante em locais onde a velocidade das correntes da componente norte e a altura superficial do mar são menores que 0,5 m/s, evidenciando que o atum se associa a águas mais quentes e tranquilas.

A

**Influência das variáveis ambientais na redistribuição dos juvenis de atum de barbatana amarela (*Thunnus albacares*) no nordeste do Oceano Índico.**



**B**



**Figura 3.** Ilustração da distribuição espaço-temporal do *Yellowfin tunna* (a) no Oceano Índico Ocidental Norte no período entre 2005-2013. Efeitos dos fatores ambientais nas capturas no Nordeste do Oceano Índico Ocidental,

## **Influência das variáveis ambientais na redistribuição dos juvenis de atum de barbatana amarela (*Thunnus albacares*) no nordeste do Oceano Índico.**

representados em torno de 12 meses, começando de janeiro que é referenciado pelo número 1 até dezembro que é 12. (b). O eixo-x representa as covariáveis selecionadas pelo modelo e o eixo-y designada por  $f(x)$ , representa o grau de significância das covariáveis preditoras selecionadas pelo modelo. As linhas tracejadas na figura indicam os intervalos de confiança inferior e superior a 95%. As marcas pretas no eixo X indicam as observações.

## **5. Discussão**

A investigação sobre como as variáveis ambientais influenciam a distribuição de peixes é uma área de pesquisa significativa, evidenciando que diversas espécies sofrerão impactos (Cheung, 2010). No caso da espécie analisada, a maior captura ocorre durante o verão, possivelmente

## **Influência das variáveis ambientais na redistribuição dos juvenis de atum de barbatana amarela (*Thunnus albacares*) no nordeste do Oceano Índico.**

devido às condições marítimas favoráveis, como a temperatura da superfície do mar. Foi utilizado o modelo aditivo generalizado (GAM) para projetar as capturas de *Thunnus albacares*, que apresentou um desempenho satisfatório com um desvio explicado de 33,2% (Tabela 1). Esse resultado pode estar relacionado à exclusão de outros fatores ambientais ou processos no modelo, incluindo a eliminação de variáveis correlacionadas, a remoção de variáveis não significativas e a transformação dos dados na escala logarítmica.

O GAM empregado neste estudo para modelar as capturas de atum demonstrou um desempenho eficaz e um nível aceitável de precisão, com RMSE em torno de 6%, rho em 47% e D igual a 83%. Conforme sugerido em pesquisas anteriores sobre a seleção de modelos ecológicos preditivos eficazes como demonstrado por (Norberg et al., 2019; Wikle et al., 2019), ajustou-se um pequeno conjunto de modelos que mostraram desempenho complementar, seguido da aplicação de um processo de validação cruzada.

### **5.1. Efeitos das Variáveis Ambientais na Redistribuição de juvenis de *Thunnus albacares***

A relação entre as variáveis ambientais e a distribuição de juvenis de *Thunnus albacares* observados neste estudo revelam um padrão interessante, evidenciando altas taxas de captura na zona norte da área em estudo, especialmente nas latitudes entre 7° N e 12° N durante a época do verão. Em contraste, baixas capturas são registradas durante o período de transição e, subsequentemente, no inverno, nas latitudes entre 13° S e 2° N. Esse padrão sazonal de abundância pode ser relacionado a condições ambientais favoráveis a diferentes épocas do ano. A evidência de altas taxas de captura na zona norte do nordeste do Oceano Índico, especialmente nas latitudes entre 7° N e 12° N durante o verão, sugere que as condições ambientais e oceanográficas durante essa estação são adequadas para a abundância de juvenis dessa espécie no nordeste de oceano índico. Estudos anteriores corroboram essa observação, fornecem que a temperatura da superfície do mar (SST) e a concentração de clorofila são variáveis críticas que afetam a distribuição e a abundância de *Thunnus albacares* (Nóbrega et al., 2022 e Lan, 2012).

No presente trabalho a temperatura superficial do mar (SST) teve um efeito linear e foi identificada como o factor muito influente, corroborando a relevância da temperatura no habitat dos atuns, as capturas vão aumentando com o aumento da temperatura até atingirem o seu pico máximo. Conforme observado na figura B, a temperatura varia de 26° a 29° graus. Estudos demonstraram que os tunas têm uma forte preferência por temperaturas otimizadas para sua

**Influência das variáveis ambientais na redistribuição dos juvenis de atum de barbatana amarela (*Thunnus albacares*) no nordeste do Oceano Índico.**

biologia, sendo evidenciado que a YFT, por exemplo, ocupa águas cujas temperaturas variam entre 24°C a 28°C, dependendo da região e das variações climáticas (Díaz-Barroso, et al., 2022). Isso sugere que a temperatura não apenas influencia a distribuição desses peixes, mas também afecta diretamente sua abundância e movimento nas águas oceânicas (Istnaeni, et al., 2024).

Além disso, a altura da superfície do mar (SSH) observada indicou um efeito não linear sobre a distribuição, 0.4 é a região com maior abundancia desses atuns conforme ilustrado na (figura B), valores superiores ou inferiores a estes sugerem menor probabilidade de ocorrência de atuns, (Franco, et al.; 2021) afirma que é neste intervalo que ocorrem melhores condições para a formação de habitat favorável, possivelmente devido a um equilíbrio existente entre a altura superficial do mar e a dinâmica de nutrientes.

A velocidade das correntes no sentido norte demonstrou também um efeito não linear sobre a distribuição redistribuição desses juvenis na área estudada conforme observado na (figura B), que são observadas maiores capturas em regiões em que as aguas oceânicas são mais tranquilas, ou seja, em valores próximos do 0. A literatura demonstra que a velocidade das correntes desempenha um papel significativo na distribuição dos juvenis de atum, com evidências de que ambientes com correntes suaves e temperaturas adequadas favorecem sua abundância. Isso sugere uma preferência por ambientes de águas mais tranquilas e quentes, onde a energia do ambiente é menos turbulenta, favorecendo sua captura. Embora a velocidade específica das correntes possa variar, é amplamente aceito que correlações entre a dinâmica das correntes e a distribuição de juvenis seja crítica (Cataldi, et al., 2010).

A concentração de clorofila, mostrou uma correlação significativa com as capturas de juvenis, indicando que ambientes com maior produtividade primária são favoráveis à presença de YFT. Pesquisas anteriores identificaram que a clorofila está intimamente ligada à disponibilidade de presas, refletindo diretamente em sucesso de captura nas pescarias (Putri, et al., 2021). Assim, ambientes ricos em nutrientes, refletidos pela concentração de clorofila, são essenciais para a sobrevivência e o crescimento dos juvenis de atum em estágios iniciais. A produtividade primária demonstrou ser uma variável altamente significativa que dita a redistribuição dos atuns no Nordeste do Oceano Indico Ocidental. Conforme ilustrado pela figura B, que representa as regiões preferidas dos juvenis de atum-barbatana-amarela. Cada ponto no gráfico (cada

**Influência das variáveis ambientais na redistribuição dos juvenis de atum de barbatana amarela (*Thunnus albacares*) no nordeste do Oceano Índico.**

combinação de PHY e CHL) representa um tipo de habitat. A cor e o contorno indicam a favorabilidade desse habitat para a espécie. As cores quentes (vermelho e laranja) indicam os habitats mais ideais, para onde os juvenis de atum se redistribuem. (Cores Quentes à esquerda): Águas com baixo teor de clorofila, mas com biomassa de fitoplâncton moderada a alta. Este pode ser um ambiente de águas claras e ricas em nutrientes, onde a cadeia alimentar se desenvolve rapidamente. (Cores Quentes à direita): Águas com alto teor de clorofila e biomassa de fitoplâncton também alta. Este é o habitat típico de alta produtividade primária (por exemplo, um bloom de fitoplâncton), que sustenta uma cadeia alimentar robusta. A modelagem espacial, como demonstrado por (Maddumage et al., 2023), discorre sobre como a circulação oceânica e a concentração de clorofila afetam as taxas de captura de atum-barbatana-amarela na pesqueira do Sri Lanka, indicando que áreas com maior densidade de fitoplâncton são particularmente atrativas, sustentando ecossistemas marítimos ricos em nutrientes e, portanto, promovendo a sobrevivência dos juvenis de atum. A redistribuição da espécie evita os "habitats desfavoráveis". As cores frias (azuis) indicam os habitats que os juvenis de atum evitam, pois, as condições ambientais não são favoráveis. (Cores Azuis no centro): Águas com níveis intermediários de clorofila e fitoplâncton. As razões para essa aversão podem ser ecológicas (por exemplo, a indisponibilidade de presas específicas, a presença de predadores ou a toxicidade de certas algas) ou físicas (por exemplo, condições de temperatura ou oxigênio desfavoráveis). Os habitats preferenciais, como descrito nos estudos de (Maury et al., 2001), mostram que a distribuição dos atuns é intimamente ligada a variáveis ambientais. As áreas com elevado teor de fitoplâncton e clorofila são consideradas "habitats ideais", onde se observa uma concentração significativa de peixes, devido à disponibilidade de presas. Essa capacidade dos juvenis em se redistribuir para habitats favoráveis indica uma resposta adaptativa às condições propícias, direcionando-se para ambientes com alta produtividade primária, conforme elucidado por (Erauskin-Extramiana et al., 2019).

Adicionalmente, o pH da água emergiu como uma variável crítica, contribuindo com uma medição significativa para as capturas, embora não haja um consenso claro sobre o percentual exato desse impacto. A preferência dos juvenis de YFT por águas com pH entre 8,2 e 8,4 reflete a sensibilidade dos peixes a essas condições químicas. A literatura aponta que o pH é um fator importante que origina efeitos diretos sobre a fisiologia e o comportamento dos peixes (Russo, et

## **Influência das variáveis ambientais na redistribuição dos juvenis de atum de barbatana amarela (*Thunnus albacares*) no nordeste do Oceano Índico.**

al., 2022). A combinação desses factores químico-físicos é essencial para modelar ambientes propícios, evidenciando que a qualidade da água é tão vital quanto a sua temperatura para a sustentabilidade das populações de atum.

Em síntese, a interação entre variáveis ambientais, temperatura, salinidade e produtividade primária desempenha um papel crucial na dinâmica das capturas de *Thunnus albacares* e de outras espécies marinhas. Este entendimento é vital para a gestão sustentável da pesca e a preservação dos ecossistemas oceânicos, uma vez que as mudanças climáticas continuam a impactar as condições ambientais em várias regiões marinhas. A pesquisa futura deve se concentrar em modelar estas interações e prever as respostas das comunidades de peixes às alterações climáticas, proporcionando um suporte valioso para políticas de conservação e manejo sustentável.

## **6. Conclusões**

Com base nos resultados obtidos, concluí que a redistribuição dos juvenis de atum YFT está diretamente relacionada as variáveis ambientais, especialmente às variações sazonais e produtividade primária.

## **Influência das variáveis ambientais na redistribuição dos juvenis de atum de barbatana amarela (*Thunnus albacares*) no nordeste do Oceano Índico.**

Sazonalmente a distribuição geográfica dos juvenis do atum em estudo apresentam-se em maior concentração entre as latitudes (7°N a 12°N) durante o verão, com maiores taxas de captura nessa estação. Já nas latitudes centrais e meridionais (de -13°S a 2°N), as capturas foram significativamente mais baixas, sobretudo nos períodos de transição e inverno, confirmando um padrão sazonal de redistribuição associado a condições ambientais favoráveis durante essa época do ano.

O Modelo Aditivo Generalizado (GAM) aplicado demonstrou bom desempenho preditivo (RMSE  $\approx$  0,6; rho  $\approx$  0,47; D  $\approx$  0,83), explicando 33,2% da variabilidade nas capturas. A simulação evidenciou que variáveis como temperatura da superfície do mar (SST), pH, clorofila-a, fitoplâncton, velocidade das correntes e altura da superfície do mar são determinantes na distribuição dos juvenis de atum em estudo, com maior destaque a produtividade primária e a sazonalidade.

## **7. Recomendações**

- ✓ A realização de pesquisas usando modelos de previsão sob os futuros cenários climáticos na captura de *Thunnus albacares*.
- ✓ Outras melhorias poderiam ser feitas no modelo de habitat, utilizando a estrutura Bayesiana do modelo de habitat, aplicando distribuições prévias informativas (com base no conhecimento de especialistas locais, dados de marcação eletrônica e seleção de variáveis explicativas que estão mais diretamente associadas à biologia).

## **8. Referências**

Baso, A., & Nelwan, A. (2017). *Performance of fishing gear on skipjack tuna Katsuwonus*. Indonesia. March.

Billy. (2017). *Impactos das mudanças climáticas e da acidificação dos oceanos na Índia Atuns do oceano*.

Bornatowski, H., & Abilhoa, V. (2012). *Tubaroes e Raias capturadas pela pesca artesanal no Parana: guia de identificação* (1 ed.). Curitiba, Parana, Brasil.

**Influência das variáveis ambientais na redistribuição dos juvenis de atum de barbatana amarela (*Thunnus albacares*) no nordeste do Oceano Índico.**

- Brander, K. (1981). *Disappearance of common skate Raia*. Nature.
- Brander, K. (2019). Impactos das alterações climáticas nas pescas. *Pesquisa Marinha*, 79, 389–402.
- Brill, R., & Bushnell, P. (2001). *O sistema cardiovascular dos atuns*.
- Cataldi, M., Assad, L. P., Torres, A. R., & Alves, J. L. (2010). *Estudo da influência das anomalias da tsm do atlântico sul extratropical na região da confluência brasil-malvinas no regime hidrometeorológico de verão do sul e sudeste do brasil*. Revista Brasileira De Meteorologia,.
- Chassot, E., Assan, C., & Soto, M. (2015). *Estatísticas da União Europeia e frota de pesca com redes de cerco com bandeiras associadas tendo como alvo os atuns tropicais no Oceano Índico. 1981–2014*. Procedimentos da IOTC.
- Cheung, W. L. (2010). Redistribuição em grande escala do potencial máximo de captura pesqueira no oceano global sob as mudanças climáticas. 16-35.
- Cossa, N. A. (2023). *Modelação do impacto das mudanças climáticas na redistribuição do atum *Katsuwonus pelamis* no Nordeste do Oceano Índico Ocidental*. Quelimane.
- Dallazuanna, H. S., & Bonat, W. H. (2007). *Modelos Aditivos generalizados com o R*.
- Díaz-Barroso, L., Hernández-Carrasco, I., Orfila, A., Reglero, P., Balbín, R., Hidalgo, M., & Álvarez-Berastegui, D. (2022). *Singularities of surface mixing activity in the western mediterranean influence bluefin tuna larval habitats*. . Marine Ecology Progress Series.
- Dickson, J., & Dickson, K. A. (2019). *Ontogenetic change in the amount and position of slow-oxidative myotomal muscle in relationship to regional endothermy in juvenile yellowfin tuna *thunnus albacares**. Journal of Fish Biology, 95(3), 940-951.
- Dormann, C. F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., . . . Lautenbach, S. (2013). *Collinearity: A review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance*. Ecography, 36(1): 27–46.

**Influência das variáveis ambientais na redistribuição dos juvenis de atum de barbatana amarela (*Thunnus albacares*) no nordeste do Oceano Índico.**

- Erauskin-Extramiana, M., Arrizabalaga, H., Hobday, A. J., Cabré, A., Ibaibarriaga, L., Arregui, I., & Chust, G. (2019). *Large-scale distribution of tuna species in a warming ocean*. *Global Change Biology*, 25(6), 2043-2060.
- Grolemund, G., & Wickham, H. (2011). *Dates and Times Made Easy with*.
- Guisan., A., Edwards, T., & Hastie, T. (2002). *Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene*. (Vol. 157). *Ecological Modelling*.
- Hazin, F. H. (1997). *Manual de Pesca: Introdução a Oceanografia Pesqueira. Livro Manual de Pesca*. .
- International Seafood Sustainability Foundation. (2020). *Status of the World Fisheries for Tuna*.
- Istnaeni, Z. D., Hidayat, R., Zainuddin, M., Gaol, J. L., & Fitriana, D. (2024). *The ENSO effects on yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in eastern Indian Ocean - off coast Java*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1410(1), 012043.
- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2014). *An introduction to statistical learning with application in R*. In *Springer Texts in Statistics* (Vol. 64).
- Lakshadweep, K., & Sea, S. A. (2020). *Fish stock demographics of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) from Lakshadweep, Southern Arabian Sea*. December.
- Lan, K. E. (2012). *Efeitos da variabilidade climática na distribuição e condições de pesca do atum albacora (*Thunnus albacares*) no oceano Índico ocidental*. *Climatic Change*, 119(1), 63-77. .
- Liaw, A., & Matthew, W. (Classification and regression by randomForest.). 2002. *R News*, 2(3):18-22.
- Lutjeharms, J., & Town, C. (2006). *The coastal oceans of South-Eastern Africa*. *Bull. Sch. Bull. Sch.*

**Influência das variáveis ambientais na redistribuição dos juvenis de atum de barbatana amarela (*Thunnus albacares*) no nordeste do Oceano Índico.**

- Maddumage, U. S., Rajapaksha, J., & Gunatilake, J. (2023). *Effect of ocean circulation and chlorophyll-a concentration on yellowfin tuna catch rates in sri lankan logline fishery*. Ceylon Journal of Science, 52(3), 371-379.
- Mafra, e. O. (2020). Influência da variabilidade meteoceanográfica no oceano atlântico sudoeste sobre a pesca industrial de espinhel-. *Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Clima e Ambiente do Campus Florianópolis do Instituto Federal de Santa Catarina para a obtenção do diploma de Mestre em Clima e Ambiente*.
- Maury, O., Gascuel, D., Marsac, F., Fonteneau, A., & Rosa, A. D. (2001). *Hierarchical interpretation of nonlinear relationships linking yellowfin tuna (*thunnus albacares*) distribution to the environment in the atlantic ocean*. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 58(3), 458-469. .
- McKechnie, S., Hampton, J., Pilling, G. M., & N. (2016). *Stock assessment of skipjack tuna in the western and central Pacific Ocean WCPFC*.
- Nóbrega, M. F., Lira, M. G., & Oliveira, M. A. (2022). *Interactions between oceanographic variables and population structure of the yellowfin tuna *thunnus albacares* (bonnaterre, 1788) in the western central atlantic*. Fisheries Oceanography, 32(2), 213-228.
- Pecoraro , C., Zudaire, I., Bodin, N., Murua, H., Taconet, P., Díaz-Jaimes, P., & Chassot , E. (2016). *Putting all the pieces together: integrating current knowledge of the biology, ecology, fisheries status, stock structure and management of yellowfin tuna (*thunnus albacares*)*. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 27(4), 811-841.
- Pecoraro, C., Zudaire, I., Bodin, N., Murua, H., Taconet, P., Díaz-Jaimes, P., . . . Chassot, E. (2017). *Juntando todas as peças: integrando o conhecimento atual da biologia, ecologia, situação da pesca, estoque estrutura e gestão do atum albacora (*Thunnus albacares*)*. . Rev Fish Biol Fish 27:811–841.
- Pierce, D. (2017). *ncdf4: Interface to Unidata netCDF (version 4 or earlier) format data files*.
- Potier , M., Marsac , F., Lucas, V., Sabatié, R., & Hallier, J. (2004). *Distribuição alimentar entre o atum capturado nas camadas superficiais e médias: o caso do albacora (*Thunnus albacares*) e do patudo (*T. obesus*) no oeste do Oceano Índico tropical*.

**Influência das variáveis ambientais na redistribuição dos juvenis de atum de barbatana amarela (*Thunnus albacares*) no nordeste do Oceano Índico.**

- Putri, A. R., Zainuddin, M., Musbir, M., Mustapha, M. A., Hidayat, R., & Putri, R. S. (2021). *Impact of increasing sea surface temperature on skipjack tuna habitat in the flores sea, indonesia*. OP Conference Series: Earth and Environmental Science, 763(1), 012012.
- Reglero, P., Tittensor, D., Álvarez-Berastegui, D., Aparicio-González, A., & Worm, B. (2014). *Distribuições mundiais de atum larvas: revisitando hipóteses sobre requisitos ambientais para habitats de desova*.
- Ribeiro, F. L. (2010). *A Pesca em Moçambique*. Revista de Marinha: 3-4.
- Rocha, V., & Cynthia, G. (2016). *Manual de ecossistema marinhos e costeiros*. Santos São paulo: Editora comunicar.
- Roger, C. (1994). *Relações entre albacora e gaiado, suas presas e plâncton no oeste tropical do Oceano Índico*.
- Russo, S., Torri, M., Patti, B., Musco, M., Masullo, T., Natale, M. D., & Cuttitta, A. (2022). *Environmental conditions along tuna larval dispersion: insights on the spawning habitat and impact on their development stages*. . Water, 14(10), 1568. .
- Santos, J., & Andrade, H. (2010). *A pesca da albacora-lage (thunnus albacares) realizada pela frota brasileira de vara e iscaviva no sudoeste do oceano atlântico*. Revista Brasileira de Ciência e Tecnologia Aquática, 8(1), 95. .
- Schaefer, K., & Fuller, D. W. (2022). *Spatiotemporal variability in the reproductive biology of yellowfin tuna (thunnus albacares) in the eastern pacific ocean*. Fisheries Research, 248, 106225. .
- Schaefer, K., Fuller, D., & Block, B. (2009). *Movimentos verticais e utilização de habitat de gaiado (Katsuwonus pelamis), atum albacora (Thunnus albacares) e atum patudo (Thunnus obesus) no Oceano Pacífico Oriental equatorial, verificado através de dados de etiqueta de arquivo*. .
- Schott, F. (1983). *Monsoon response of the Somali Current and associated upwelling*. Progress in Oceanography. Obtido de <https://doi.org/10.1029/2007RG000245>

**Influência das variáveis ambientais na redistribuição dos juvenis de atum de barbatana amarela (*Thunnus albacares*) no nordeste do Oceano Índico.**

- Shankar, D., Vinayachandran, P. N., & Unnikrishnan, A. S. (2002). *The monsoon currents in the north Indian Ocean*. Progress in Oceanography.
- Shi, X., Zhang, J., Wang, X., Wang, Y., Li, C., & Shi, J. (2022). *Reproductive biology of yellowfin tuna (*thunnus albacares*) in tropical western and central pacific ocean*. Fishes, 7(4), .
- Vaske-Júnior, T., Vooren, C., & Lessa, R. (2003). *Estratégia alimentar de atum albacora (*Thunnus albacares*) e wahoo (*Acanthocybium solandri*) no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Brasil*. Bull Inst Fish 29: 173–181.
- Vayghan, A. H., Lee, M.-A., Weng, J.-S., Mondal, S., Lin, C.-T., & Wang, Y.-C. (2020a). *Multisatellite-Based Feeding Habitat Suitability Modeling of Albacore Tuna in the Southern Atlantic Ocean*. Remote Sensing, 12(16), 2515. .
- Wood, S. N. (2006). *Generalized additive models: An introduction with R*. Biometrics, 63, 1298–1299.
- Wood, S. N. (2017). *Generalized Additive Models: An Introduction with R (2nd edition)*. Journal of the Royal Statistical.
- Yee, T. W., & Mitchell, N. D. (1991). *Generalized additive models in plant ecology*. J. Veg. Sci. 2.
- Zagaglia, C. R., Lorenzetti, J. A., & Stech, J. L. (2004). *Remote sensing data and longline catches of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the equatorial Atlantic*. Remote Sensing of Environment., 93(1–2):267–81.
- Zhang, J. (2016). *spaa: SPecies Association Analysis*. Obtido de <https://CRAN.R-project.org/package=spaa>
- Zudaire, I., Murua, H., Grande, M., Goñi, N., Potier, M., Ménard, F., . . . Bodin, N. (2015). *Variações na dieta e proporções de isótopos estáveis durante o desenvolvimento ovariano de fêmeas de atum albacora (*Thunnus albacares*) na Índia Ocidental Oceano*. Março Bio 162:2363–2377.

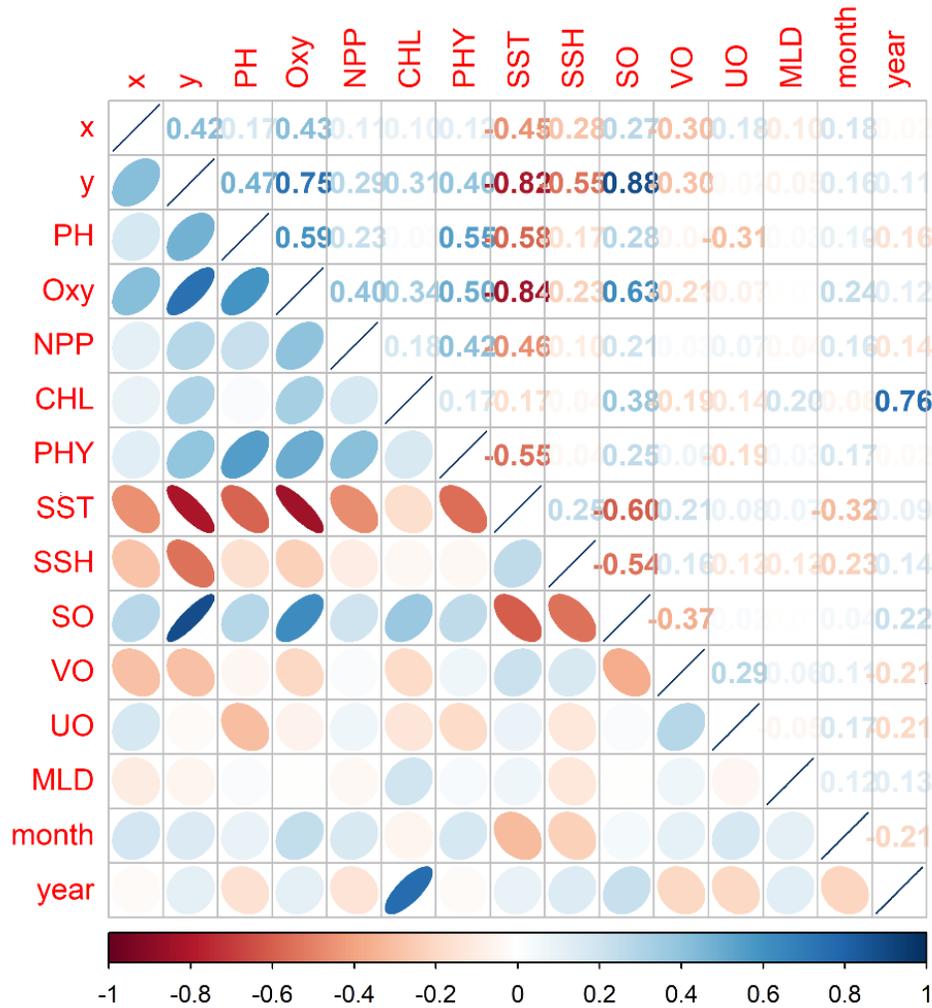
**Influência das variáveis ambientais na redistribuição dos juvenis de atum de barbatana amarela (*Thunnus albacares*) no nordeste do Oceano Índico.**

Zuur, A. F., Ieno, E. N., & Elphick, C. S. (2010). *A protocol for data exploration to avoid common statistical problems*. *Methods in Ecology and Evolution*, 1(1): 3–14.

Zuur, A. F., Ieno, E. N., Walker, N. J., Saveliev, A. A., & Smith, G. M. (2009). *Mixed effects models and extensions in ecology with R*. Springer Science 2: 1–564. .

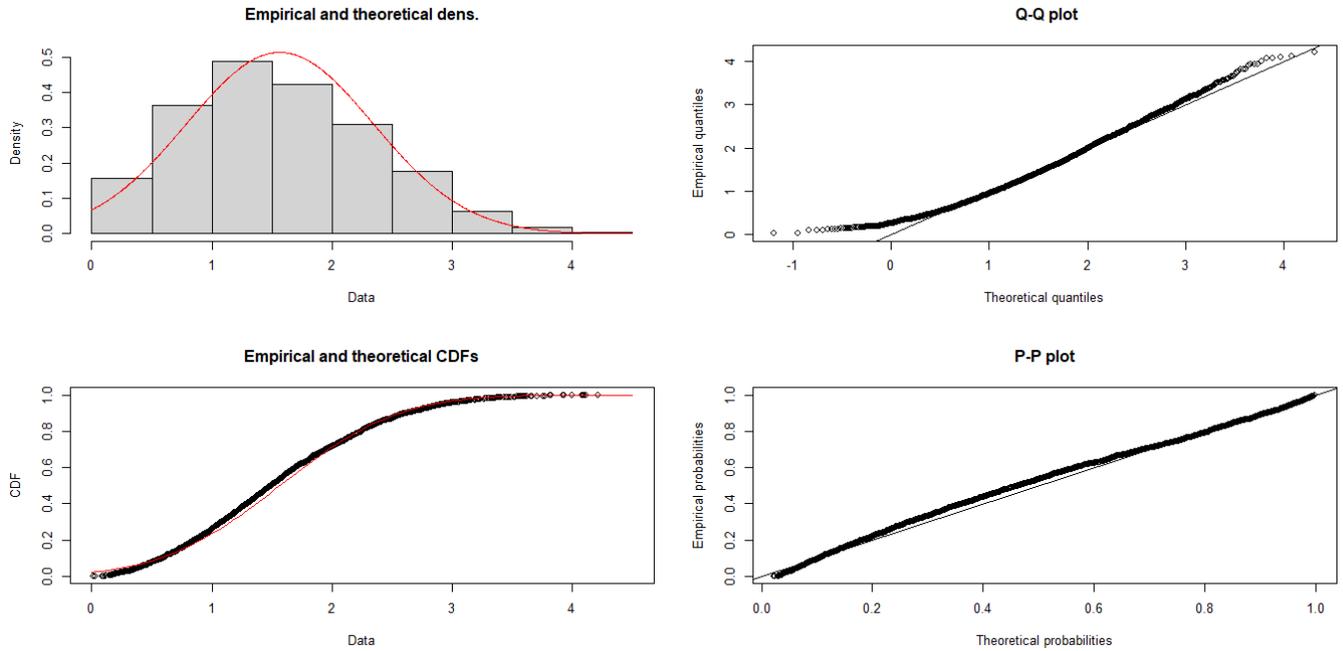
**Anexos**

**Influência das variáveis ambientais na redistribuição dos juvenis de atum de barbatana amarela (*Thunnus albacares*) no nordeste do Oceano Índico.**



**Figura a:** Correlação de Pearson entre as variáveis predictoras usadas para selecionar o Modelo. . SSH- altura da superfície do mar, SST- temperatura da superfície do mar, Oxy-Oxigênio dissolvido, pH-Potencial de Hidrogénio, NPP-Produtividade Primária Líquida , PHY- Fitoplancton , UO- Velocidade da Corrente no Sentido Este, y-Longitude em graus, x-Latitude em graus e Year-ano.

**Influência das variáveis ambientais na redistribuição dos juvenis de atum de barbatana amarela (*Thunnus albacares*) no nordeste do Oceano Índico.**



**Figura b.** Distribuição normal da variável resposta transformada na escala logarítmica para ajuste do modelo GAM. Painel superior esquerdo ilustra o histograma da distribuição da densidade, o painel superior a direita mostra o qqplot com cerca de 95% dos pontos na linha de referência de 45 graus justificando a normalidade, painel inferior esquerdo descreve as probabilidades de uma variável aleatória ter valores menores ou iguais a x.