

# **Predicción de hábitats potenciales de dorado (*Coryphaena hippurus*) y atún (*Scombridae*) y su relación con cambios ambientales en el Océano Pacífico Oriental Tropical**

**Por**

**Estefania Isaza Toro**



Facultad de Ciencias Naturales y Exactas

Departamento de Biología

Santiago de Cali, Colombia

2020



# **Predicción de hábitats potenciales de dorado (*Coryphaena hippurus*) y atún (Scombridae) y su relación con cambios ambientales en el Océano Pacífico Oriental Tropical**

Tesis

Presentada al Programa de Doctorado en Ciencias del Mar  
Facultad de Ciencias Naturales y Exactas  
Universidad del Valle

Por

**Estefania Isaza Toro**

Como requisito parcial para optar al título de  
**Doctor en Ciencias del Mar**

Directores

Doctor John Josephraj Selvaraj

Doctor Alan Giraldo López

Cali, 18 de Diciembre de 2020.

El Doctorado en Ciencias del Mar es un programa interinstitucional que se desarrolla en convenio entre la Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, la Universidad del Valle, la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad del Norte, la Universidad del Magdalena y la Universidad de Antioquia, con la participación del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR- y la Comisión Colombiana del Océano - CCO.



## *Dedicatoria*

*Dedicada a todos los que me conocieron, apoyaron, orientaron, criticaron, escucharon y alentaron a terminar este proceso. Sólo ustedes saben lo feliz que me hace aprender a diario, de todos y de todo.*

*A ti donde quiera que estés, gracias por la inspiración y fuerza, la paciencia y la oportunidad de estar aquí, hoy y ahora, logrando uno de mis logros más satisfactorios que seguro te enorgullece también.*



---

## Agradecimientos

Desarrollar una tesis doctoral fue siempre una motivación personal impulsada por mi deseo constante de conocimiento y aprendizaje, razón por la cual inicio agradeciendo al Programa Interinstitucional de Ciencias del Mar y a sus profesores, por la aceptación, dedicación y acompañamiento al inicio del proceso.

De manera muy especial, doy gracias al Dr. John Selvaraj de la Universidad Nacional - Palmira y al Dr. Alan Giraldo de la Universidad del Valle, por haber aceptado ser mis directores de tesis y respaldo durante el desarrollo del doctorado. Su paciencia y orientación fue determinante para que lograra cumplir con los objetivos y metas trazadas.

Agradezco al hoy Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación - COLCIENCIAS y su Programa de Formación de Doctorados Nacionales, pues me escogió como beneficiaria de la Convocatoria No. 647, gracias a la cual pude cumplir mi deseo de cursar mis estudios doctorales. Es mi anhelo que se sigan dando facilidades y apoyo a todas aquellas personas que puedan aportar conocimiento y herramientas de calidad que permitan fortalecer las capacidades de desarrollo del país.

Agradezco el apoyo y financiación recibida por parte de la Corporación Centro de Excelencia en Ciencias Marinas - CEMarin, pues me permitió realizar intercambios de conocimientos y experiencias con otros profesionales que aportaron significativamente a mi aprendizaje.

Doy gracias a la Escuela Universitaria de Estudios Empresariales de la Universidad de Vigo - España y el Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas - CICIMAR - del Instituto Politécnico Nacional de México ya que fueron los lugares escogidos para el desarrollo de las pasantías de investigación. Estoy muy agradecida por el cálido recibimiento en ambos sitios, además de la objetividad y disposición de los profesores y personal de ambas instituciones.

Doy las gracias también a mi familia, a todos y cada uno de sus integrantes, quienes de diferentes formas y en diferentes tiempos, me motivaron y apoyaron en todo lo que implica hacer un doctorado.

Gracias al legado que recibí de ustedes.



---

## Resumen

Los modelos de distribución de especies permiten evaluar la relación especie-ambiente, siendo las especies de interés comercial las más evaluadas. A este grupo pertenecen *Thunnus albacares*, *Katsuwonus pelamis* y *Coryphaena hippurus*, especies base de diferentes pesquerías pues se caracterizan por su distribución mundial y beneficios socioeconómicos para los países que las aprovechan. Por lo anterior es conveniente analizar si sus rangos de distribución y zonas de idoneidad ambiental actual podrían cambiar con respecto al escenario de cambio climático más extremo (RCP 8.5) proyectado al año 2050 y 2100. Para responder a lo anterior, se emplearon registros de presencia reportados por el Programa de Observaciones Pesqueros de Colombia y la Infraestructura Mundial de Información en Biodiversidad, información ambiental Bio-ORACLE y el paquete de ensamble de modelos de distribución de especies BIOMOD 2. Se seleccionó el Bioclim como el modelo de distribución de especies más adecuado para analizar las condiciones ambientales actuales y futuras más favorables para las especies. En condiciones actuales, la zona de mayor idoneidad ambiental considera temperaturas cercanas a 27°C, salinidades de 34 y velocidad de las corrientes de 0.1 m/s. Esta zona se ubicó entre los 2 y 4 grados de latitud norte, extendiéndose desde la zona transfronteriza Colombia-Ecuador, aproximadamente desde los 82 grados de longitud oeste hasta aguas internacionales, pero se reubicó al sur de la línea ecuatorial según el escenario de cambio climático RCP 8.5 proyectado al año 2050 y 2100. Los resultados de este estudio indican que el cambio climático si afectaría significativamente la distribución potencial de especies de importancia comercial para el Pacífico Oriental Tropical a futuro, por lo cual se hace necesario la implementación de planes de adaptación frente a las posibles y nuevas condiciones ambientales, las cuales podrían impactar directamente en la economía y seguridad alimentaria de las comunidades que aprovechan estos recursos pesqueros.

**Palabras clave:** *Thunnus albacares*, *Katsuwonus pelamis*, *Coryphaena hippurus*, cambio climático, RCP 8.5, Bioclim, Pacífico Oriental Tropical.

---

## Abstract

Species distribution models allow for the quantification of the species-environment relationship, with species of commercial interest being the most evaluated. To this group belong *Thunnus albacares*, *Katsuwonus pelamis* and *Coryphaena hippurus*, species that are the basis of different fisheries. These species are characterized by their global distribution and socio-economic benefits to countries. Therefore, it is convenient to analyze whether their distribution ranges and current environmental suitability areas could change with respect to the most extreme climate change scenario (RCP 8.5) projected for 2050 and 2100. To address this, presence records reported by the Colombian Fisheries Observation Program and the Global Biodiversity Information Facility, environmental information from Bio-ORACLE and the species distribution model assembly package BIOMOD 2 were used. Under current conditions, the highest suitability zone considers temperatures close to 27°C, salinities of 34 and current velocities of 0.1 m/s. This zone was located between 2 and 4 degrees north latitude, extending from the Colombia-Ecuador transboundary zone, approximately from 82 degrees west longitude to international waters, but was relocated south of the equator according to the RCP 8.5 climate change scenario projected to 2050 and 2100. The results of this study indicate that climate change would significantly affect the potential distribution of commercially important species in the Eastern Tropical Pacific in the future, making it necessary to implement adaptation plans to possible new environmental conditions, which could directly impact the economy and food security of communities that use these fisheries resources.

**Keywords:** *Thunnus albacares*, *Katsuwonus pelamis*, *Coryphaena hippurus*, climate change, RCP 8.5, Bioclim, Eastern Tropical Pacific Ocean.

---

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen</b> .....	IX
<b>Abstract</b> .....	X
<b>Lista de figuras</b> .....	XIII
<b>Lista de tablas</b> .....	XV
<b>Glosario y Abreviaturas</b> .....	1
1.Distribución de especies e Idoneidad de hábitat.....	1
2.Instituciones y proyectos .....	2
3.Información ambiental. ....	3
4.Información pesquera. ....	3
<b>Introducción</b> .....	5
1.Planteamiento del problema y antecedentes .....	5
2.Hipótesis y Objetivos .....	8
3.Alcances, resultados esperados y limitaciones.....	9
<b>Capítulo 1:</b> El Programa de Observadores Pesqueros de Colombia como fuente de información.....	11
1.Introducción .....	11
2.Materiales y métodos.....	12
3.Resultados.....	24
3.1.Características de la flota cerquera de bandera extranjera.....	24
3.2.Características de las faenas atuneras y lances realizados.....	25
3.3.Descripción de la captura reportada. ....	31
3.4.Distribución espacial de la captura. ....	33
4.Discusión .....	35
4.1.Sobre el Programa de Observadores Pesqueros de Colombia .....	35
4.2.Sobre las capturas reportadas y tipos de lance identificados. ....	36
5.Conclusiones y recomendaciones .....	38
5.1.Sobre el Programa de Observadores Pesqueros de Colombia .....	38
5.2.Sobre la captura y tipos de lance reportados por el POPC .....	39
5.3.Sobre los Dispositivos Agregadores de Peces.....	40
<b>Capítulo 2:</b> Revisión diagnóstica de las fuentes de información ambiental.....	42
1.Introducción .....	42
2.Materiales y Métodos.....	45
3.Resultados.....	49
4.Discusión .....	58

---

5.Conclusiones y recomendaciones .....	60
<b>Capítulo 3: Modelos de distribución de especie, idoneidad de hábitat y cambios en el rango de distribución .....</b>	<b>61</b>
1.Introducción .....	61
2.Materiales y métodos.....	63
2.1.Preparación de información previo a la generación de los modelos.....	63
2.2.Selección de los modelos de distribución de especies .....	66
2.3.Generación de pseudoausencias y configuración de algoritmos.....	69
2.4.Interpretación de resultados, evaluación, ensamble y validación .....	69
3.Resultados.....	69
3.1.Heterogeneidad ambiental y análisis de componentes principales... ..	69
3.2.Modelos de distribución de especie, AUC y curvas de respuesta .....	72
3.3.Contribución de los predictores ambientales y prueba de Jackknife..	78
3.4.Mapas de distribución potencial e idoneidad de hábitat.....	79
3.5.Validación del modelo .....	84
4.Discusión .....	85
4.1.Sobre los modelos de distribución de especie, distribuciones potenciales e idoneidad ambiental en condiciones actuales.....	85
4.2.Sobre los pronósticos y cambios en el rango de distribución según el RCP 8.5 .....	87
5.Conclusiones y recomendaciones .....	89
5.1.Sobre los modelos de distribución de especie, distribuciones potenciales e idoneidad ambiental en condiciones actuales y futuras .....	89
<b>Conclusión General.....</b>	<b>93</b>
Anexo A. Captura total de atunes y dorado, entre 2009 y 2015 .....	92
Anexo B. Distribución espacial de lances efectivos para <i>T. albacares</i> .....	93
Anexo C. Distribución espacial de lances efectivos para <i>K. pelamis</i> .....	94
Anexo D. Distribución espacial de lances efectivos para <i>C. hippurus</i> .....	95
Anexo E. Mapas de idoneidad de hábitat para <i>T. albacares</i> según Bioclim .....	96
Anexo F. Mapas de idoneidad de hábitat para <i>K. pelamis</i> según Bioclim .....	97
Anexo G. Mapas de idoneidad de hábitat para <i>C. hippurus</i> según Bioclim .....	98
Anexo K. Socialización de resultados .....	99
Bibliografía .....	100

---

## Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Zona de estudio ubicada en el et-POT, indicando los lances realizados .....	18
Figura 2. Clasificación taxonómica de las especies de interés identificadas.....	19
Figura 3. Ilustración de <i>Coryphaena hippurus</i> (dorado, mahi-mahi o DOL). .....	20
Figura 4. Ilustración de <i>Auxis rochei</i> .....	20
Figura 5. Ilustración de <i>Euthynnus lineatus</i> (atún barrilete negro o BKJ). .....	21
Figura 6. Ilustración de <i>Katsuwonus pelamis</i> ( atún barrilete o SKJ). .....	22
Figura 7. Ilustración de <i>Thunnus albacares</i> (atún aleta amarilla o YFT).....	23
Figura 8. Ilustración de <i>Thunnus obesus</i> ( atún ojo gordo, patudo o BET).....	23
Figura 9. Distribución de los lances por embarcaciones de diferentes clases CIAT.....	25
Figura 10. Distribución mensual de la cantidad días efectivos de pesca para las faenas atuneras entre 2009 y 2015. ....	26
Figura 11. Distribución anual de los día efectivos de pesca según nacionalidad del barco. ....	27
Figura 12. Distribución mensual de D.E.P para las faenas atuneras, entre 2009 y 2015. ....	27
Figura 13. Efectividad y tipos de lances identificados entre 2009 y 2015.....	28
Figura 14. Cantidad, efectividad y tipo de lances reportados por el POPC entre 2009 y 2015. ....	28
Figura 15. Distribución espacial anual de los lances tipo DAP, entre 2009 y 2015. ....	29
Figura 16. Distribución espacial anual de los lances tipo NOA entre 2009 y 2015.....	30
Figura 17. Distribución temporal de la captura acumulada reportada entre 2009 y 2015. ....	31
Figura 18. Distribución anual de la captura de YFT reportada por el POPC entre 2009 y 2015. ....	32
Figura 19. Distribución anual de la captura de SKJ reportada por el POPC entre 2009 y 2015. ....	32
Figura 20. Distribución temporal de la captura de dorado, entre 2009 y 2015. ....	33
Figura 21. Distribución espacial anual de los lances efectivos por especie entre 2009 y 2015. ....	34
Figura 22. Cambios administrativos en la autoridad pesquera colombiana.....	35
Figura 23. Distribución espacial de las estaciones ERFEN-Colombia .....	51
Figura 24. Distribución temporal y a profundidad de la temperatura del agua medida con diferentes instrumentos.....	53

---

Figura 25. Cobertura espacial de las mediciones de temperatura hechas con diferentes instrumentos.....	54
Figura 26. Cobertura espacial la temperatura superficial según climatología del WOA. ...	55
Figura 27. Cobertura espacial de TSM medida con el MODIS-Aqua. ....	56
Figura 28. Cobertura espacial de la temperatura superficial según Bio-ORACLE para condiciones a) Presente, b) Año 2050 y c) Año 2100. ....	57
Figura 29. Distribución de coordenadas de presencia de <i>C. hippurus</i> reportados a) El POPC y b) Descargados del GBIF.....	65
Figura 30. Consideraciones para la evaluación de los modelos. ....	69
Figura 31. Ejemplo de gráfico ROC. ....	69
Figura 32. Diagrama de flujo de la metodología aplicada para la generación de los modelos de distribución de especies.....	69
Figura 33. Distribución de ocurrencias filtradas para: YFT (superior), SKJ (centro) y DOL (inferior). ....	72
Figura 34. AUC para los diferentes modelos de distribución generados para <i>T. albacares</i> (superior), <i>K. pelamis</i> (centro) y <i>C. hippurus</i> (inferior). ....	73
Figura 35. Curvas de respuesta y estadística descriptiva de a) TSM, b) Salinidad y c) Velocidad de las corrientes para <i>T. albacares</i> , generadas con el modelo Bioclim. ....	75
Figura 36. Curvas de respuesta y estadística descriptiva de a) TSM, b) Salinidad y c) Velocidad de las corrientes para <i>K. pelamis</i> , generadas con el modelo Bioclim. ....	76
Figura 37. Curvas de respuesta y estadística descriptiva de a) TSM, b) Salinidad y c) Velocidad de las corrientes para <i>C. hippurus</i> , generadas con el modelo Bioclim. ....	77
Figura 38. Resultados de prueba <i>Jackknife</i> señalando la contribución de las variables ambientales a los modelos de Bioclim en condiciones iniciales. ....	79
Figura 39. Mapas de idoneidad de hábitat para <i>T. albacares</i> (izquierda), <i>K. pelamis</i> (centro) y <i>C. hippurus</i> (derecha), en condiciones actuales (superior), RCP. 8.5: 2050 (centro) y RCP 8.5: 2100 (inferior). ....	81
Figura 40. Cambios en el rango de distribución de <i>T. albacares</i> (izquierda), <i>K. pelamis</i> (centro) y <i>C. hippurus</i> (derecha), según RCP. 8.5: 2050 (superior) y RCP. 8.5: 2100 (inferior). ....	83
Figura 41. Curvas de respuesta y AUC para el <i>T. albacares</i> para el año 2015.....	84
Figura 42. Distribución espacial anual de los lances efectivos para <i>T. albacares</i> reportados por el POPC entre 2009 y 2015. ....	93
Figura 43. Distribución espacial anual de los lances efectivos para <i>K. pelamis</i> reportados por el POPC entre 2009 y 2015. ....	94
Figura 44. Distribución espacial anual de los lances efectivos para <i>C. hippurus</i> reportados por el POPC entre 2009 y 2015. ....	95
Figura 45. Mapas de idoneidad de hábitat para <i>T. albacares</i> según condiciones iniciales (superior), RCP 8.5: 2050 (centro) y RCP 8.5: 2100 (inferior). ....	96
Figura 46. Mapas de idoneidad de hábitat para <i>K. pelamis</i> según condiciones iniciales (superior), RCP 8.5: 2050 (centro) y RCP 8.5: 2100 (inferior). ....	97
Figura 47. Mapas de idoneidad de hábitat para <i>C. hippurus</i> según condiciones iniciales (superior), RCP 8.5: 2050 (centro) y RCP 8.5: 2100 (inferior). ....	98

---

## Lista de tablas

**Pág.**

Tabla 1. Formatos diligenciados por los observadores del POPC durante las faenas atuneras realizadas.....	13
Tabla 2. Códigos de especie, arte de pesca, tipo de lance y unidad de captura considerados.....	15
Tabla 3. Ejemplo de las cabeceras de las hojas de cálculo y registro de información biológico-pesquera.....	16
Tabla 4. Clasificación de las embarcaciones atuneras identificadas.....	24
Tabla 5. Cantidad de faenas revisadas válidas y descartadas, según nacionalidad de embarcación.....	26
Tabla 6. Resumen de los escenarios de cambio climático RCPs.....	45
Tabla 7. Instrumentos de medición y términos WOD.....	46
Tabla 8. Fuentes de información oceanográfica consultadas para el POT.....	49
Tabla 9. Cantidad de estaciones ERFEN muestreadas por año.....	50
Tabla 10. Conjuntos de datos disponibles para el et-POT, según el WOD.....	51
Tabla 11. Características de las variables predictoras seleccionadas.....	58
Tabla 12. Algoritmos empleados y disponibles en BIOMOD2.....	67
Tabla 13. Configuraciones propuestas por cada algoritmo trabajado.....	69
Tabla 14. Matriz de contingencia Observación-Predicción.....	69
Tabla 15. Estadísticos de evaluación: exactitud y tasa de errores de clasificación.....	69
Tabla 16. Estadísticos de evaluación: Sensibilidad y Especificidad.....	69
Tabla 11. Análisis de componentes principales aplicado a la capa ambiental marina.....	70
Tabla 18. Cantidad inicial y final de ocurrencias después del filtro de heterogeneidad ambiental.....	71
Tabla 13. Captura total reportada para las 5 especies de atún (toneladas) y una especie de dorado (individuos).....	92
Tabla 14. Listado de publicaciones.....	99

---

## Glosario y Abreviaturas

Para una mejor comprensión del lector y organización del documento, los términos y significados se agrupan en las cinco temáticas generales:

1. [Distribución de especies e Idoneidad de hábitat.](#)
2. [Instituciones y proyectos.](#)
3. [Información ambiental.](#)
4. [Información pesquera.](#)

### 1. Distribución de especies e Idoneidad de hábitat.

- **ANN:** *Artificial Neural Network*, también conocidos como Redes Neuronales Artificiales (ART).
- **AUC:** *Área Under de Curve* o Área Bajo la Curva.
- **Bioclim:** Técnica de análisis y predicción bioclimática empleado en este trabajo para predecir distribuciones de especies.
- **BRT:** *Boosted Regression Trees* o Árboles de Regresión Potenciados (ARP).
- **CTA:** *Classification Tree Analysis* o Análisis de Árboles de Clasificación (AAC).
- **FDA:** *Flexible Discriminant Analysis* o Análisis Flexible Discriminante (AFD).
- **GAM:** *Generalized Additive Model* o Modelo Aditivo Generalizado (MAG).
- **GBM:** *Generalized Boosting Model* o Modelo Generalizado Potenciado (MGP).

- **GLM:** *Generalized Linear Model* o Modelo Lineal Generalizado.
- **HSI:** *Habitat Suitability Index* o Índice de Idoneidad de Hábitat.
- **MARS:** *Multivariate Adaptive Regression Splines* o Regresión Adaptativa Multivariada de *Splines* o tramos.
- **MaxEnt:** Modelo de máxima entropía que busca la distribución más uniforme u homogénea.
- **Prevalencia:** Hace referencia a la proporción de sitios ocupados (presencias) con respecto a las cantidades de ausencias.
- **ROC:** *Receiver* o *Relative Operating Characteristic*. La Característica Operativa Relativa o del Receptor (COR) es la representación gráfica de la Sensibilidad con respecto a la Especificidad.
- **SDM :** *Species Distribution Models* o Modelos de Distribución de Especie (MDE).
- **Sensibilidad:** (*Sensitivity*), hace referencia a la proporción de presencias pronosticadas correctamente.
- **Especificidad:** (*Specificity*) , hace referencia a la proporción de ausencias pronosticadas correctamente.
- **Tabla de contingencia:** Permite registrar y analizar la información de presencias y ausencias pronosticadas correcta e incorrectamente, para la mayoría de los algoritmos.

## 2. Instituciones y proyectos

- **AUNAP:** Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca de Colombia.
- **BCCVL:** *Biodiversity and Climate Change Virtual Laboratory* o Laboratorio Virtual de Biodiversidad y Cambio Climático.
- **GBIF:** *Global Biodiversity Information Facility* o Infraestructura Mundial de Información en Biodiversidad.

- **ICA:** Instituto Colombiano Agropecuario.
- **INCODER:** Instituto Colombiano de Desarrollo Rural.
- **INPA:** Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura.
- **POPC:** Programa de Observadores Pesqueros de Colombia.

### 3. Información ambiental.

- **CMIP 5:** *Coupled Model Intercomparison Project* o Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados, fase 5.
- **POT:** Pacífico Oriental Tropical.
- **et-POT:** Extremo Oriental del Pacífico Oriental Tropical.
- **RCP:** *Representative Concentration Pathways* o Rutas de Concentración Representativa.
- **SST:** *Sea Surface Temperature* o Temperatura Superficial del Mar.
- **SAL:** *Salinity* o Salinidad del Mar.

### 4. Información pesquera.

- **Captura:** Para este estudio, hace referencia a la cantidad de peces (individuos o peso en toneladas) capturados independiente de su destino o uso.
- **DOL:** Sigla referente al nombre común *dolphinfish*, correspondiente a la especie de interés comercial *Coryphaena hippurus*.
- **Especie objetivo:** Se refiere a las especies de principal interés económico o comercial.
- **Lance efectivo:** Hace referencia al despliegue y recogida de la red de cerco, con captura.
- **Lance en blanco:** Lo opuesto al lance efectivo.

- **Lance tipo NOA:** Despliegue y recogida de la red de cerco sobre atunes de natación libres o no asociados.
- **Lance tipo DAP:** Similar al lance NOA, pero sobre atunes asociados a objetos flotantes que actúan como Dispositivos Agregadores de Peces. Pueden ser fijos o de deriva, de origen natural o antrópico.
- **SKJ:** Sigla referente al nombre común *skipjack tuna*, correspondiente a la especie comercial *Katsuwonus pelamis*.
- **YFT:** Sigla referente al nombre común *yellowfin tuna*, correspondiente a la especie comercial *Thunnus albacares*.

---

# Introducción

## *1. Planteamiento del problema y antecedentes*

Aspectos ecológicos, de conservación y, recientemente, los sistemas de información geográficos, son los contextos más sobresalientes que relacionan las características del medio ambiente y el comportamiento de poblaciones de especies de interés comercial (Holmes, Lewis, Banks, & Veit, 1994). En ecología, la dependencia espacial es un suceso que se presenta frecuentemente, debido a que la distribución espaciotemporal de los individuos no es aleatoria. Lo anterior se debe a que, generalmente, existe una tendencia hacia las agregaciones en respuesta a diversos aspectos como los de carácter medioambiental, trayendo como consecuencia que la estructura y función de poblaciones marinas, por ejemplo, se pueda explicar a partir de análisis temporales y espaciales de dichas condiciones ambientales como aquellas dadas por el comportamiento de las variables oceanográficas físicas y nutricionales (Cuello et al., 2007; Zainuddin, 2011; Zainuddin et al., 2017). Los efectos de las variaciones en la temperatura y salinidad del océano en los organismos marinos han sido documentados ampliamente, relacionándolos con consecuencias diversas, desde limitaciones en la reproducción, alimentación y blanqueamiento de corales (Ateweberhan & McClanahan, 2010; Strychar & Sammarco, 2009) hasta una mayor sensibilidad en los invertebrados marinos a la presencia de cobre (Holan, King, Proctor, & Davis, 2019). Para el caso de poblaciones marinas y específicamente de pesquerías, el

---

conocimiento de la estructura poblacional de las especies de interés es uno de los requerimientos base para delimitar unidades y medidas de manejo que conduzcan a una planificación efectiva del uso de los recursos (Mourato et al., 2010). Dentro de las especies marinas pelágicas de mayor interés comercial se encuentran los atunes (Familia Scombridae) y al dorado (*Coryphaena hippurus*, Linnaeus, 1758). La importancia comercial de estas especies pelágicas radica en su rápido crecimiento y desarrollo sexual (Lessa & Duarte-Neto, 2004; W. Oxenford & Hunte, 1983), y en su distribución en regiones tropicales y subtropicales de todo el mundo (Díaz-Jaimes et al., 2010; Miyake, Guillotreau, Sun, & Ishimura, 2010), lo cual demuestra su alta capacidad de migración (Alejo-Plata, Díaz-Jaimes, & Salgado-Ugarte, 2011). La combinación de las características mencionadas previamente hace de los atunes y dorados una importante fuente de alimento y de ingresos económicos a diferentes escalas y en diferentes regiones (Amoros, Gozzer, Melgar, & Rovergno, 2017; B. B. Collette & Nauen, 1983). Por lo anterior, se han realizado incontables estudios enfocados a la optimización de las pesquerías, abarcando desde la comprensión y mejora en las técnicas y artes de pesca (Tang et al., 2017; Zhou, Xu, Hu, & Kumazawa, 2015), hasta el análisis de las relaciones existentes entre capturas exitosas y las condiciones ambientales (Song & Zhou, 2010). Los análisis de las pesquerías de especies pelágicas en función de variables ambientales han sido favorecidos por los adelantos tecnológicos y esfuerzos interdisciplinarios a diferentes escalas (Klemas, 2013; Nurdin, Mustapha, Lihan, & Zainuddin, 2017), derivando así en estudios que ofrecen perspectivas más amplias y complementarias sobre el comportamiento de sus poblaciones con cambios ambientales. Actualmente, dentro de las líneas de mayor interés y desarrollo se encuentra la que aborda los modelos de distribución de especies. Poder asociar la presencia de especies con características específicas del ambiente permite realizar diferentes aproximaciones conducentes a mejores planes de manejo (Zellmer, Burdick, Medel, Pondella, & Ford, 2018), amortiguación de la presencia de especies invasoras (Shrestha, Sharma, Devkota, Siwakoti, & Shrestha, 2018) e incluso predecir posibles redistribuciones debido a alteraciones en el entorno (Yan et al., 2017). Los modelos de distribución de especies parten de información de presencia

---

de la misma (Monk et al., 2010), aunque también pueden emplearse registros de presencia-absencia (Watts et al., 2011) o incluso abundancia (Brosse, Guegan, Tourenq, & Lek, 1999), los cuales se conjugan matemática y estadísticamente con las variables ambientales predictoras (Guisan & Thuiller, 2005), generando como resultado información (mapas e índices de idoneidad y curvas de respuesta) asociada con zonas más o menos idóneas y/o con mayor o menor probabilidad de ocurrencia de la especie. A pesar de los esfuerzos interdisciplinarios que buscan comprender la interacción especie-ambiente y el desarrollo y mejoramiento de técnicas matemáticas y estadísticas que permiten el análisis de la información de forma más completa y objetiva, en el POT los principales esfuerzos de investigación se han enfocado en analizar el impacto que tienen los cambios ambientales propios del fenómeno de El Niño Oscilación del Sur – ENSO en las pesquerías de interés comercial a escala local, nacional y regional (Espíndola, Yáñez, & Böhm, 2005; French et al., 2020; Morata, Ballesteros, Rohrer, & Stoffel, 2018). El componente oceanográfico del ENSO se caracteriza principalmente por dos fases antagónicas: la fase Niño, que se relaciona con el incremento en la temperatura superficial del agua (hasta 4°C) , profundización de la termoclina (Grados, Chaigneau, Echevin, & Dominguez, 2018; Pennington et al., 2006), desplazamiento latitudinal en sentido sur del frente ecuatorial y disminución en la velocidad de las corrientes marinas (Barber & Chavez, 1983); mientras la fase Niña se caracteriza precisamente por lo contrario (Wang & Fiedler, 2006). Durante las fases cálidas (Niño), las pesquerías de la región se han visto afectadas de diferente forma, ya sea por un desplazamiento o incluso desaparición de los stocks pesqueros (Hernández-Santoro, Landaeta, & Castillo Pizarro, 2018; Miller, 1984), o por la presencia de especies pertenecientes a otras latitudes gracias a los cambios en la temperatura y disponibilidad de alimento (Zeidberg & Robison, 2007). Para las pesquerías de grandes pelágicos como el atún y dorado en el POT, las consecuencias de los cambios ambientales asociados al ENSO han sido indirectas y se relacionaron principalmente con los cambios en la disponibilidad y distribución de presas (Bertrand et al., 2020; Fernández-Álamo & Färber-Lorda, 2006; Kiyofuji et al., 2019; Suárez-Sánchez, Ritter-Ortiz, Gay-García, & Torres-Jácome, 2004). A pesar de

---

que el ENSO es un evento de tipo estacional, son claros los efectos que este tiene sobre las pesquerías. Esta situación invita a evaluar entonces los posibles impactos que podrían tener los cambios ambientales presentados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático en su Quinto Informe de Evaluación (*Fifth Assessment Report – AR5*). Estos cambios incluyen el incremento en la temperatura del agua, cambios en la salinidad y en las velocidades de las corrientes marinas. En ese orden de ideas, en este estudio se busca analizar los posibles efectos que las variaciones ambientales tendrían sobre las distribuciones potenciales de atún y dorado, bajo escenarios de cambio climático extremo y proyectados en diferentes épocas. Para lograr lo anterior, se pretende seleccionar el mejor modelo de distribución de especies que permita explicar y proyectar hábitats potenciales para el atún y el dorado en el Pacífico Oriental Tropical bajo condiciones ambientales actuales y futuras, según lo sugerido por el panel.

Recordando que en el POT los estudios de variaciones climáticas se relacionan principalmente con el efecto del ENSO sobre los recursos pesqueros, los resultados de esta tesis son un complemento importante para el planteamiento de planes de manejo y adaptación frente al cambio climático proyectado a mediano y largo plazo.

Adicional a lo anterior, este estudio también representa un aporte valioso para el país pues se hará a partir de registros inéditos adquiridos por el Programa de Observadores Pesqueros de Colombia, en conjunto con información reportada en bases de datos mundiales e información oceanográfica modelada.

## *2. Hipótesis y Objetivos*

**Primera Hipótesis:** La hipótesis general sugiere que, para condiciones actuales en el Pacífico Oriental Tropical - POT, los modelos de distribución de especie y HSI para el dorado y el atún se explican principalmente por cambios en variables físicas como temperatura superficial del agua, velocidad de las corrientes y salinidad.

---

**Segunda Hipótesis:** Las distribuciones del dorado y atún proyectadas bajo condiciones futuras de incremento de temperatura superficial como indicador de cambio climático, ocupan zonas diferentes a las propuestas bajo condiciones ambientales actuales.

**Objetivo General:** Evaluar las condiciones ambientales que influyen en la distribución potencial de atún y dorado, mediante la generación de modelos de distribución de especie, con respecto a condiciones ambientales actuales y proyectadas a futuro, según el escenario de cambio climático más extremo.

**Objetivos Específicos:**

1. Analizar la distribución potencial del dorado y atún a partir de diferentes predictores ambientales y modelos de distribución de especies, en condiciones actuales en el Pacífico Oriental Tropical.
2. A partir del mejor modelo de distribución para cada especie, definir el Índice de Idoneidad de Hábitat en el Pacífico Oriental Tropical.
3. A partir del mejor modelo de distribución para cada especie, proyectar las distribuciones potenciales futuras de las especies de interés según el escenario de cambio climático más extremo, al año 2050 y 2100.

### *3. Alcances, resultados esperados y limitaciones*

#### *Alcances y resultados esperados*

Esta tesis, por ser de tipo descriptiva y explicativa, tiene como alcances:

1. Reconstruir la serie de tiempo de las capturas de atunes y dorado obtenidas por embarcaciones cerqueras de bandera extranjera monitoreadas por el Programa de Observadores Pesqueros de Colombia – POPC.

- 
2. Presentar una caracterización detallada de las faenas atuneras desarrolladas y de la captura obtenida, incluyendo una descripción espaciotemporal.
  3. Ofrecer a los diferentes actores nacionales (AUNAP, Parques Nacionales Naturales de Colombia, Corporaciones Autónomas Regionales, sector industrial y comercial) las herramientas necesarias para una mejor comprensión de las dinámicas pesqueras enfocadas al recurso atún y dorado, con lo cual se espera sea posible fortalecer medidas de control y vigilancia conducentes a la preservación de estos recursos a escala local y regional.

### Limitaciones

- Aunque se cuenta con información de abundancia de captura (representada en toneladas de atún o individuos de dorado), la metodología y resultados de esta tesis se limitan al uso de registros de presencia de las especies. Por lo anterior, no se profundizará en este tema, sin embargo se considerará para análisis futuros.
- Las principales limitaciones identificadas durante el desarrollo de esta tesis fueron la veracidad, frecuencia y rigurosidad en la toma de información base, lo cual se refleja en interrupción en la serie de tiempo reconstruida. Lo anterior debido a la discontinuidad en la gestión y el manejo de los recursos pesqueros, así como cambios constantes en las políticas pesqueras y entidades administrativas desde la década de 1990.

# Capítulo 1: El Programa de Observadores Pesqueros de Colombia como fuente de información

## 1. Introducción

Históricamente, los programas de monitoreo biológico se han desarrollado con el propósito de obtener información que permita profundizar en el conocimiento de las dinámicas poblacionales a diferentes escalas, abrir nuevas líneas de investigación y brindar respaldo técnico-científico a planes de manejo, ordenación y propuestas de uso sustentable de los diferentes recursos naturales. En Colombia, la gestión y manejo de los recursos hidrobiológicos, así como la implementación de sus políticas se encuentran a cargo de la Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca - AUNAP, la cual realiza labores de planificación, investigación, ordenamiento, fomento, regulación, registro, información, inspección, vigilancia y control de las actividades pesqueras y derivadas de la acuicultura. El cumplimiento de los compromisos y desarrollo de las funciones mencionadas se hace principalmente a partir de información colectada en el marco programas de observadores a bordo. Para el caso de Colombia existen dos programas de monitoreo de actividad atunera: el Programa Nacional de Observadores de Colombia – PNOC (Consulta en internet: <http://pescalimpia.org>) que monitorea barcos atuneros colombianos con puerto de zarpe y arribo y desembarco de la captura en el Caribe colombiano y el segundo, conocido como el Programa de Observadores Pesqueros de Colombia - POPC. Este segundo programa monitorea embarcaciones extranjeras con puertos de zarpe y arribo en el Pacífico colombiano, principalmente en el municipio de Tumaco (Nariño), aunque la comercialización de la captura se hace en el exterior principalmente en Ecuador. Ambos programas se establecen en respuesta a los

tratados internacionales con la Comisión Interamericana del Atún Tropical - CIAT (Ley 579 de 2000), el Acuerdo sobre el Programa Internacional para la Conservación de Delfines – APICD (Ley 557 de 2000) y la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres – CITES (Ley 17 de 1981). Es importante mencionar también que, a pesar de que el POPC se estableció en el año 2013 mediante la Resolución 87 del 28 de enero de 2013, la autoridad pesquera ha recopilado información pesquera desde años anteriores. Aun así y hasta la fecha, la información disponible al público a través de la CIAT es la obtenida en el marco del PNOG. En ese orden de ideas, en este capítulo presentamos por primera vez la distribución espaciotemporal de la información biológico-pesquera reportada por el POPC para la región oriental del Pacífico Oriental Tropical, resaltando la importancia de dicho programa como fuente de información complementaria a los programas de monitoreo vigentes a escala nacional. La información presentada en este capítulo incluye específicamente el análisis de la captura de especies de interés comercial en términos de toneladas o individuos reportada por el POPC y se presenta además la distribución espaciotemporal de los lances realizados y los días efectivos de pesca. Los resultados presentados en este capítulo son necesarios para estimar los índices de abundancia y de distribución de especies (Silva et al., 2016; Yen, Wang, & Lu, 2017) información indispensables en la gestión y administración de recursos pesqueros .

## **2. Materiales y métodos**

### *2.1. Información biológico-pesquera*

El proceso de adquisición, revisión de los registros pesqueros, control de calidad y transcripción de la información tuvo los siguientes pasos:

- *Solicitud de acceso a la información*: Petición escrita para acceder a la información pesquera recopilada en el marco del POPC, por parte de la Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca - AUNAP.

- Preparación de los registros: Clasificación y organización de los formatos originales en físico diligenciados por los observadores pesqueros en el marco del POPC. La organización se hizo a partir de la secuencia cronológica de las faenas desarrolladas y el orden de diligenciamiento de los formatos. Los formatos físicos revisados se presentan en la Tabla 1, considerando que cada paquete de formatos diligenciados corresponde al registro de 1 (una) faena realizada por embarcación.

**Tabla 1.** Formatos diligenciados por los observadores del POPC durante las faenas atuneras realizadas.

Nombre del formato	Objetivo
Certificado de captura	Amplía la información registrada en el registro de captura de atún.
Clasificación en kilos (5 categorías)	Clasifica la captura obtenida, por cada lance en 5 categorías.
<b>Acta desembarco</b>	<b>Legalización de captura.</b>
<b>Registro de captura atún – RCA</b>	<b>Contiene información de coordenadas de lance, especie capturada y cantidad medida en toneladas.</b>
Resumen de tonelaje estimado guardado por bodega.	Totaliza la captura de la faena guardada por bodegas.
<b>Registro de fauna marina -RFM</b>	<b>Informa sobre las especies de capturadas y/o desechadas, así como incidentales. Clasifica al atún en 3 categorías de peso y a incidentales por 3 tamaños.</b>
Registro de tiburones – RT.	Informa sobre captura incidental de tiburones, por especie, talla, cantidad de individuos, sexo y destino.
Registro objetos flotantes – ROF.	Indica características del dispositivo agregador (DAP): componentes, dispositivo localizador, procedencia e ilustraciones.
Registro de tortugas marinas.	Indica la especie, actividad, cantidad, asociación o no a objetos flotantes y destino.
Registro de picudos.	Indica la especie, actividad, cantidad, asociación o no a objetos flotantes y destino.
Avistamiento de atuneros.	Registra presencia de otros barcos atuneros observados durante la faena.
Bitácora del observador.	Apuntes del observador sobre las faenas y hechos de posible interés.
Formato inspección de desembarco de productos	Contiene fecha de zarpe y atraco del barco, permisos de pesca, características de la embarcación, tipo de pesca, características y cantidad.

- Control de calidad: El proceso de control de calidad incluyó una revisión completa de todos los formatos físicos diligenciados por los observadores a bordo, verificando el completo y correcto diligenciamiento de cada uno y la concordancia entre la información consignada entre todos los formatos, las actas de desembarco y las bitácoras de los observadores. Se hizo especial énfasis en la cantidad de especies objetivo identificadas, así como en las unidades de captura reportadas y tipo de lance realizado. Los formatos con información incompleta o inconsistente conllevan al descarte de la faena realizada.
  
- Adopción de estándares ISO, códigos y unidades de captura: Los estándares ISO se adoptan como parte de las buenas prácticas sugeridas para almacenar y compartir información oceanográfica (CTN Diocean, 2016; DIMAR, 2008; ISO, 2019; ODS, 2019), prácticas que pueden aplicarse también a los registros de información pesquera. Los estándares, códigos considerados y unidades de captura fueron:
  - i. Estándar ISO 6709 para representación de coordenadas sugiriendo que los datos de latitud y longitud se expresen en fracciones con precisión de 3 decimales (DD.ddd).
  
  - ii. Estándar ISO 8601 para el intercambio y almacenamiento de datos de fecha y hora. Dada la naturaleza de los datos, se empleó el formato extendido para fecha y hora (aaaa-mm-ddTHH:mm:ss).
  
  - iii. Estándar ISO 3166 para la representación de los códigos de los países asociados al pabellón de las embarcaciones monitoreadas.
  
  - iv. Códigos para especie, arte de pesca, tipo de lance y unidad de captura (Tabla 2) según lo indicado por la Comisión Interamericana del Atún Tropical (IATTC, 2017b).

**Tabla 2.** Códigos de especie, arte de pesca, tipo de lance y unidad de captura considerados.

Bandera	Especie	Unidad de captura	Tipo de lance	Arte de pesca
➤ Colombia (COL)	➤ <i>Thunnus albacares</i> (YFT)	Toneladas	➤ Peces no asociados (NOA) ➤ Dispositivo Agregador de Peces (DAP)	Red de cerco (PS)
➤ Ecuador (ECU)	➤ <i>Thunnus obesus</i> : (BET)			
➤ México (MEX)	➤ <i>Katsuwonus pelamis</i> (SKJ)			
➤ Panamá (PAN)	➤ <i>Euthynnus lineatus</i> (BKJ)			
➤ Perú (PER)	➤ <i>Auxis rochei</i> (BLT)			
	➤ <i>Coryphaena hippurus</i> : DOL	Individuos		

- *Diseño de las cabeceras de las hojas de cálculo:* Se diseñaron las cabeceras de las hojas de cálculo que permitieran una correcta consignación de la información, considerándose las siguientes cabeceras de las columnas:
  - *Rep.:* Secuencia numérica de los lances realizados, cada fila corresponde a un reporte.
  - *Barco:* Código alfabético empleado para diferenciar los barcos.
  - *Inicio\_faena [aaaa-mm-dd]* y *Fin\_faena [aaaa-mm-dd]:* Fechas consignadas en el formato de inspección de desembarco necesarios para definir la duración de la faena.
  - *Fecha\_lance [aaaa-mm-dd]:* Fecha de lance consignada por el observador a bordo, independiente de la captura obtenida o el tipo de lance realizado.
  - *Lat [DD.ddd]* y *Lon [DD.ddd]:* Coordenadas de lance.
  - *Lances DAP/ NOA:* Para indicar el tipo de lance realizado se utiliza 1, lo contrario equivale a 0.
  - *YFT [ton\_cap]:* Ejemplo de código y cantidad de toneladas para la especie *Thunnus albacares*. Cada especie y toneladas capturadas se consigna en columnas consecutivas.

- Escaneo de formatos originales y transcripción de la información: Los formatos físicos organizados secuencial y cronológicamente fueron agrupados por faena y embarcación. Se generó un archivo final por cada faena, compuesto por todos los formatos escaneados y almacenado en formato *Portable Document Format* (.pdf). Posteriormente se digitó la información de los formatos escaneados en hojas de cálculo de Microsoft Excel®, como se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Ejemplo de las cabeceras de las hojas de cálculo y registro de información biológico-pesquera.

Rep.	Barco	inicio_faena [aaaa-mm-dd]	fin_faena [aaaa-mm-dd]	fecha_lance [aaaa-mm-dd]	Lat [dd.ddd]	Lon [-dd.ddd]	Lance dap	Lance noa	YFT [ton_cap]
1	A	2009-11-30	2009-12-28	2009-12-02	4,765	-77,867	0	1	10
2	A	2009-11-30	2009-12-28	2009-12-03	5,143	-77,910	0	1	5
3	A	2009-11-30	2009-12-28	2009-12-05	4,208	-77,738	0	1	5

- Entrega de información a la AUNAP: Cumpliendo con los compromisos adquiridos derivados de la autorización del uso de la información del POPC, el día 10 de Febrero de 2017 se regresó la información solicitada a la AUNAP Sede Central en Bogotá. Esta se entregó en medio magnético e incluyó:
  - i. Los formatos originales organizados por nombre de embarcación y fecha de faena, escaneados y presentados en formato .pdf.
  - ii. Los registros completos de las faenas atuneras transcritos en hojas de cálculo de Microsoft Excel®, incluyendo las coordenadas de lance y captura para las especies de interés comercial (atunes) y el dorado (incidental) únicamente. Los libros de cálculo se almacenaron en carpetas diferenciando por año.

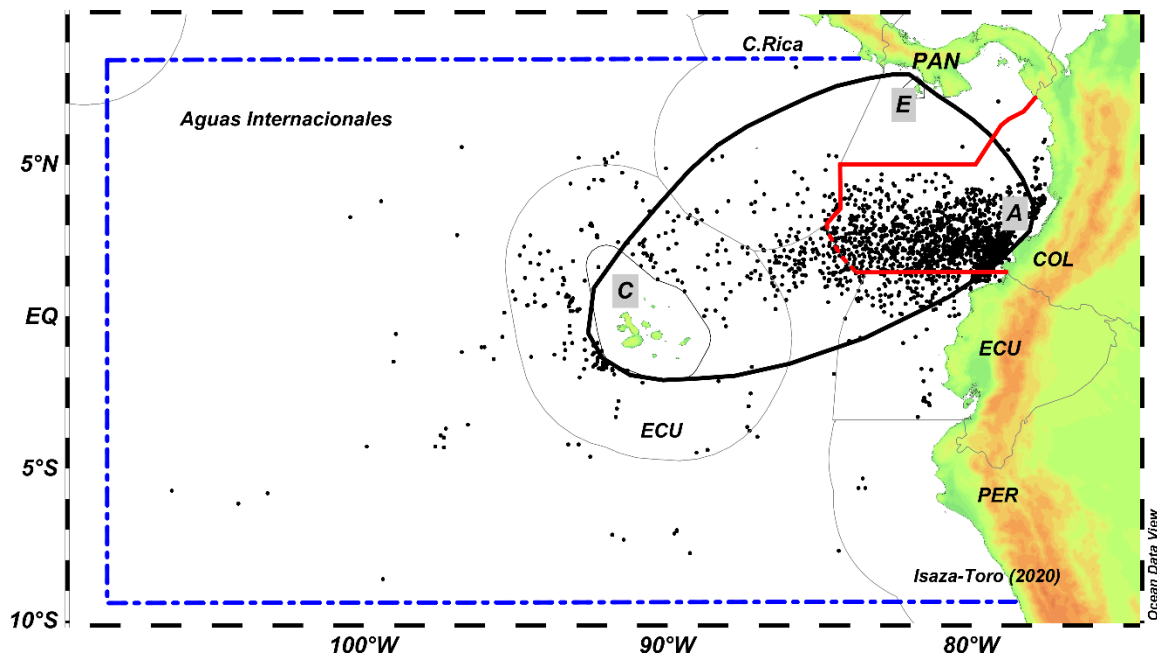
Se aclara que no se realizó ningún proceso adicional de control de calidad a esta información, procurando entregar la información en estado original para que sea utilizada como base para futuros análisis por parte de la AUNAP, según las buenas prácticas en el manejo de datos.

- Identificación de lances en tierra: A partir de la información consignada en hojas de cálculo y alineado con el desarrollo de los objetivos de esta tesis, se verificaron las posiciones de los lances, con el propósito de descartar

cualquier registro en tierra. Para esto se generaron mapas preliminares de distribución espacial superficial de los lances realizados. Estos mapas se generaron con la herramienta computacional de libre acceso *Ocean Data View* – ODV® (Schlitzer, 2018, versión 5.1.7) y exportaron en formato *Joint Photographic Experts Group* – JPG. Este procedimiento permitió también delimitar la zona de estudio y visualizar el alcance de las embarcaciones según su clasificación CIAT.

## 2.2. Zona de estudio

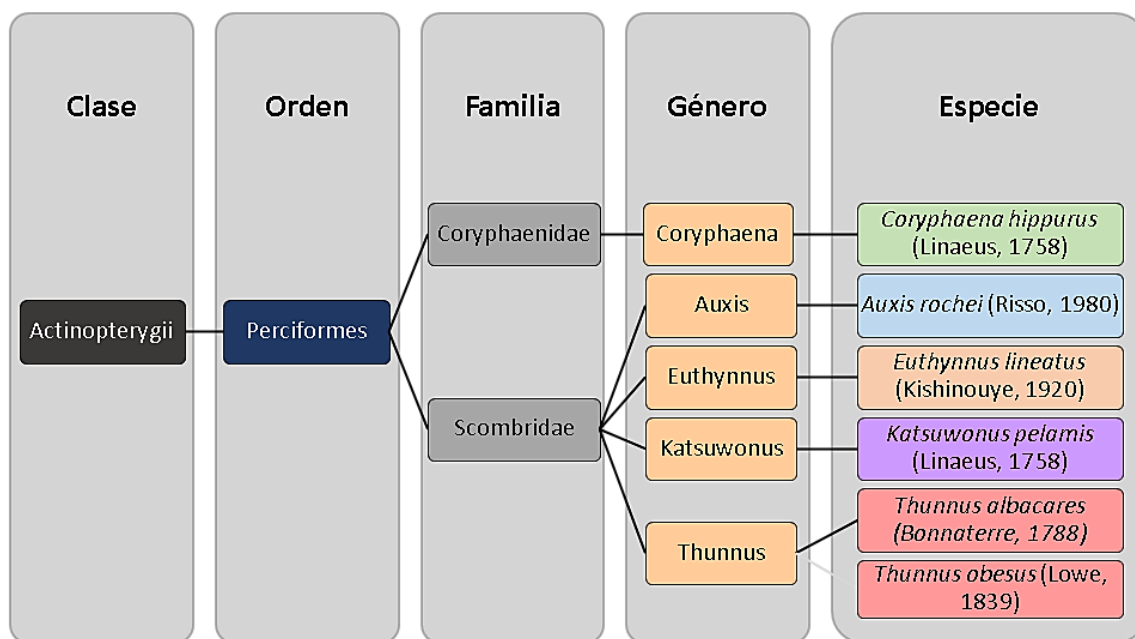
La zona de estudio delimitada por el alcance de los lances reportados por el POPC se ubicó entre los 9 grados de latitud sur y 8.5 de latitud norte, y entre 108.5 y 77 grados de longitud oeste (Figura 1). La mayoría de los lances se realizó en el extremo oriental del Pacífico Oriental Tropical – et-POT, en la zona transfronteriza comprendida entre Isla Gorgona e Isla Malpelo (Colombia), Islas Galápagos (Ecuador), Isla Cocos (Costa Rica) e Isla de Coiba (Panamá), área conocida como Corredor Marino del Pacífico del Este Tropical – CMAR. Esta zona está catalogada como un Área Marina de Importancia Ecológica o Biológica- EBSA (CBD, 2013) cuyo principio es la conexión ecológica entre las islas mencionadas previamente, las cuales a su vez hacen parte de la Red Regional de Áreas Costeras y Marinas Protegidas del Pacífico Sudeste (CPPS, 2010). Dicha conectividad sugiere el desarrollo de procesos biológicos y físicos que conectan especies y ecosistemas entre estas localidades, a través de las corrientes marinas (Briggs, 1961; Calle-Bonilla, Giraldo, & Cuéllar-Chacón, 2017; Z. M. Hu & Fraser, 2016) y rutas migratorias de especies como las incluidas en este estudio (Boustany, Matteson, Castleton, Farwell, & Block, 2010a; Fujioka et al., 2018).



**Figura 1.** Zona de estudio ubicada en el et-POT, indicando los lances realizados (puntos negros), delimitación del CMAR (línea negra continua), delimitación de territorio cubierto por el POPC (línea punteada azul), ZEE de Colombia (línea roja continua) y A) Isla Gorgona, B) Isla Malpelo, C) Islas Galápagos, D) Isla Cocos y E) Isla Coiba.

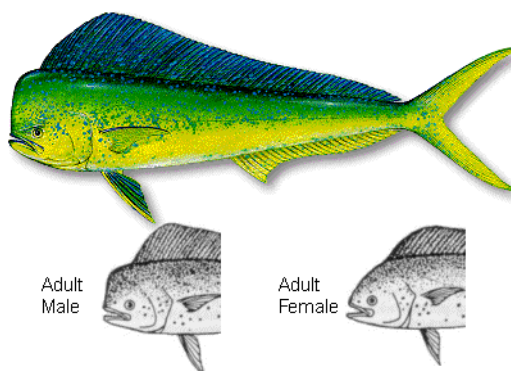
### 2.3. *Presentación de las especies*

La revisión de los formatos permitió identificar seis especies pelágicas de interés comercial, las cuales se clasifican en dos familias: Coryphaenidae con solo un (1) género y especie, y Scombridae con cuatro géneros (4) y seis (6) especies (Figura 2).



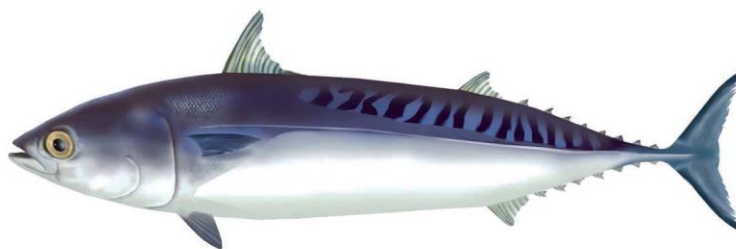
**Figura 2.** Clasificación taxonómica de las especies de interés identificadas.

- *Coryphaena hippurus*: Es una especie depredadora presente en aguas tropicales y subtropicales de todo el mundo con temperaturas entre 21°C y 30°C y salinidades cercanas a 31 (Palko, Beardsley, & Richards, 1982). Presentan coloración metálica brillante de colores verdes y azules en la región dorsal y tonos dorados y amarillos a los lados (Grove & Lavenberg, 1997). Presenta un rápido crecimiento (pudiendo alcanzar tallas de 1 metro durante su primer año) y marcado dimorfismo sexual siendo los machos los de mayor tamaño corporal, además de tener la frente abultada. Las hembras se caracterizan por ser de menor tamaño y tener poco pronunciada la frente (Figura 3), además pueden producir entre 80 mil y 1 millón de huevos en cada desove, evento que puede ocurrir entre dos y tres veces por año (Beardsley, 1967).



**Figura 3.** Ilustración de *Coryphaena hippurus* (dorado, mahi-mahi o DOL). Se hace especial énfasis en la diferenciación sexual entre machos adultos (izq) y hembras adultas (der). Tomado de: <http://www.belizefishfinder.com/dorado-mahi/>

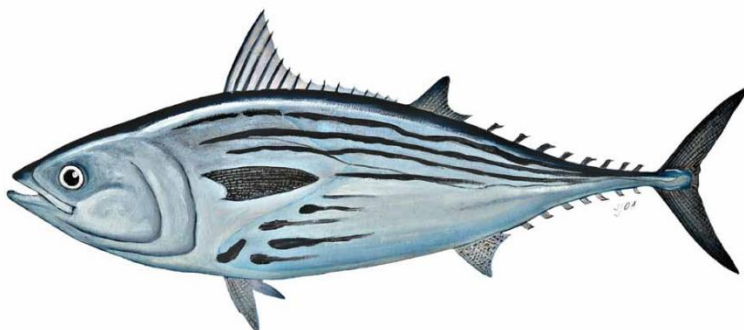
- *Auxis rochei*: Conocido como melva o bonito, es un pez pelágico de distribución mundial, presente en aguas tropicales y subtropicales (B. B. Collette & Nauen, 1983). Presenta coloración entre azul oscuro y púrpura en la región dorsal y cabeza, contrastando con abdomen blanco y franjas oscuras oblicuas detrás de las aletas dorsales (Figura 4) (Grove & Lavenberg, 1997). A los dos años alcanzan su primera madurez sexual con aproximadamente 35 cm de longitud de horquilla (Rodríguez-Roda, 1983).



**Figura 4.** Ilustración de *Auxis rochei* (melva o BLT). Tomado de (Valeiras & Abad, 2006).

- *Euthynnus lineatus*: El barrilete negro se encuentra en el POT, específicamente en el territorio comprendido entre las costas de California hasta el norte del Perú y extendiéndose longitudinalmente hasta las Islas

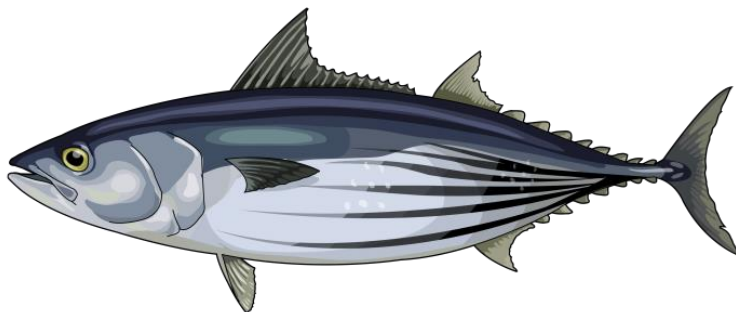
Galápagos. Se caracteriza por tener colores iridiscentes en la gama de los azules con franjas (de 3 a 5) negras en la región dorsal y puntos oscuros (grises o negros) encima de las aletas pélvicas (Figura 5). Su tamaño oscila entre 30 y 65 cm de longitud horquilla y describen un posible patrón migratorio de norte a sur a lo largo del año, alcanzando el norte del territorio marítimo del Perú en el último trimestre del año, siendo frecuente encontrarlos en zonas donde la temperatura del agua alcanza los 23°C (B. B. Collette & Nauen, 1983).



**Figura 5.** Ilustración de *Euthynnus lineatus* (atún barrilete negro o BKJ).

- *Katsuwonus pelamis*: Esta especie se asocia con un rango de temperatura entre 15°C y 30°C, lo cual le permite alcanzar profundidades de hasta 260 metros durante el día, emergiendo a la zona superficial durante la noche. Al ser una especie altamente migratoria y de natación rápida, su distribución incluye regiones tropicales y subtropicales de todo el mundo, lo cual la ubica dentro de las especies de mayor captura y comercialización del mundo. Puede alcanzar tallas de 80 cm de longitud horquilla, su madurez sexual a los 45cm, con temporadas de desove durante todo el año en zonas tropicales y entre mayo y septiembre en zonas subtropicales. Durante las temporadas de desove, una hembra puede alcanzar a producir entre 80 mil y 2 millones de huevos (B. B. Collette & Nauen, 1983). Se le conoce comúnmente como atún barrilete debido a su coloración azul metálico con franjas violetas a lo largo de su región dorsal, contrastando con la zona

abdominal que suele ser blanca o amarillo claro (Figura 6) y suele agregarse en torno a discontinuidades hidrográficas como los afloramientos y frentes térmicos (Matsumoto, Skillman, & Dizon, 1984).



**Figura 6.** Ilustración de *Katsuwonus pelamis* ( atún barrilete o SKJ). Consultado en <https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/wiki/index.php?title=Archivo:Bonito-listado.png>

- *Thunnus albacares*: Se caracteriza por ser una especie cosmopolita, distribuida en aguas tropicales y subtropicales del mundo. Es una especie epipelágica que alcanza profundidades máximas de 100 metros, se asocia especialmente con zonas de alta concentración de oxígeno y las temperaturas abarcan desde 18°C hasta 31°C (B. B. Collette & Nauen, 1983). La temporada reproductiva de esta especie va desde abril hasta octubre, con máximos de desove entre junio y agosto, épocas en las cuales los desoves pueden ser continuos y cada dos días especialmente sobre la línea ecuatorial. Es una especie que puede alcanzar tallas de hasta 2 metros longitud horquilla, presenta coloración azul oscuro en la región posterior, contrastando con tonos amarillos y plateados en la región abdominal y recibe el nombre de atún aleta amarilla gracias a la coloración amarillo brillante de sus aletas dorsales y anales (Figura 7). (Itano, 1996).

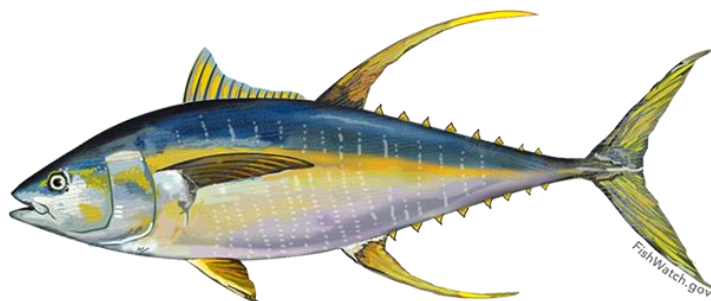


Figura 7. Ilustración de *Thunnus albacares* (atún aleta amarilla o YFT). Consultado en: <https://www.fisheries.noaa.gov/species/atlantic-yellowfin-tuna>

- *Thunnus obesus*: Similar al atún aleta amarilla, *Thunnus obesus* (conocido como atún ojo bordo o patudo) es una especie epipelágica que también tiene distribución mundial en aguas tropicales y subtropicales, alcanzando una profundidad máxima de 250 metros y ocupando un rango de temperatura de 13°C a 29°C, aunque su rango óptimo se ubica entre 17°C y 22°C y suele asociarse a las termoclinas. En el Pacífico Oriental, el patudo suele desovar entre los 10 grados de latitud norte y 10 grados de latitud sur a lo largo de todo el año, con máximos de desove entre abril y septiembre en el hemisferio norte y enero y marzo en el hemisferio sur. Posee dorso color azul oscuro metálico con la parte inferior de los costados, vientre de color blanco y ojos más grandes que las demás especies mencionadas (Figura 8) (B. B. Collette & Nauen, 1983).

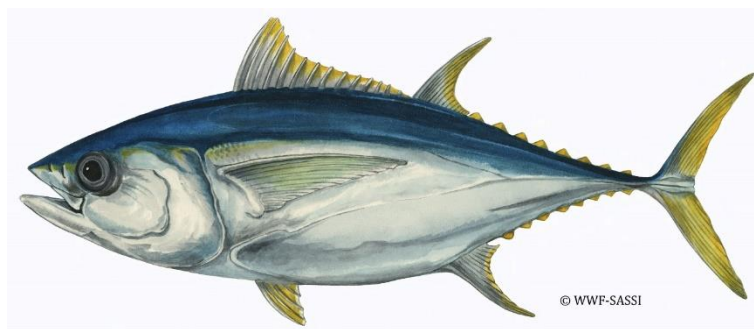


Figura 8. Ilustración de *Thunnus obesus* (atún ojo gordo, patudo o BET). Consultado en <http://wwfsassi.co.za/fish-detail/110/>

### 3. Resultados

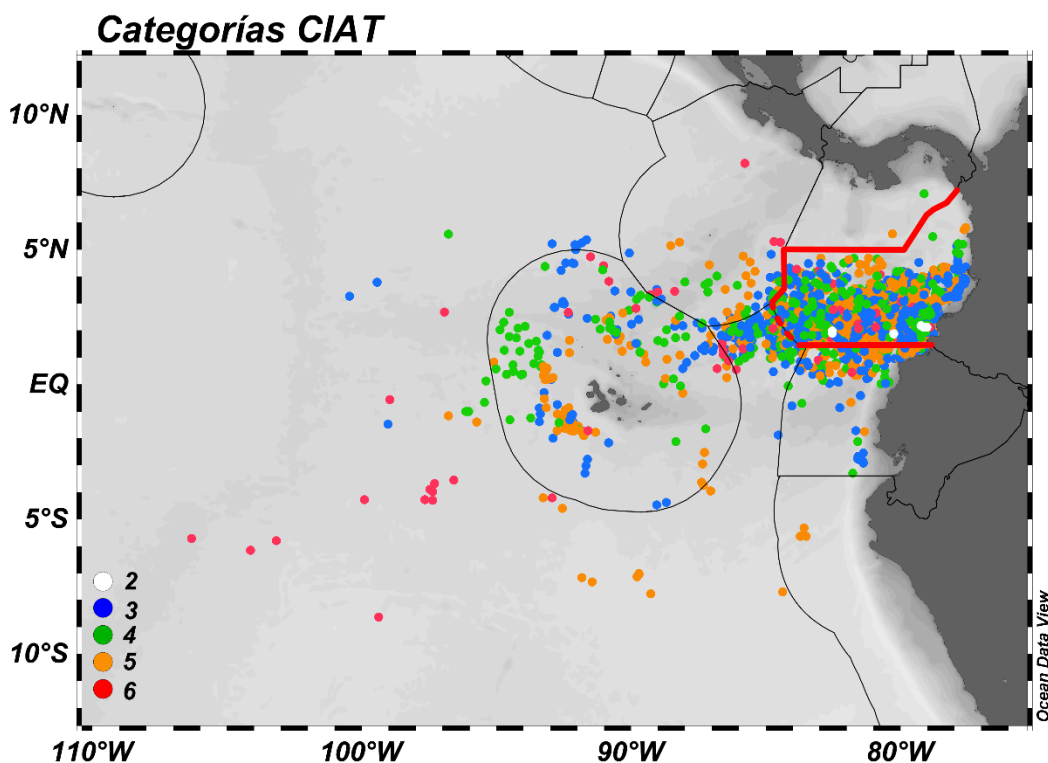
#### 3.1. Características de la flota cerquera de bandera extranjera.

La información adquirida por el POPC estuvo compuesta por 166 registros de faena pertenecientes a 27 atuneros cerqueros de bandera extranjera, los cuales desarrollaron actividad pesquera entre 2009 y 2015. Estas embarcaciones se agruparon bajo diferentes nacionalidades y clases CIAT (IATTC, 2009), siendo las embarcaciones de bandera ecuatoriana aquellas que dominaron la pesquería con un total de 22 barcos, de los cuales 13 corresponden a la clase CIAT-3 y CIAT-4. Los reportes del POPC indicaron dos embarcaciones de bandera peruana, igualmente dos para la bandera y solo una embarcación mexicana (Tabla 4).

**Tabla 4.** Clasificación de las embarcaciones atuneras identificadas.

Fuente de información		POPC
Rango de tiempo de la información		2009 a 2015
Bandera de las embarcaciones y cantidad de barcos	• Ecuador: 22	• Panamá: 2
	• Perú: 2	• México: 1
<b>Categoría o clase según la CIAT y su equivalencia en Toneladas métricas (Tm)</b>		
1: < 46		4: 182 a 272
2: 46 a 91		5: 273 a 363
3: 92 a 181		6: > 363
<b>Categoría o clase de las embarcaciones muestreadas por observadores pesqueros</b>		
País	Categoría CIAT	Cantidad de buques
Ecuador	2	1
	3	6
	4	7
	5	4
	6	4
Perú	4	2
Panamá	3	1
	6	1
México	5	1

En la Figura 9 se presenta la ubicación espacial de cada una de las cinco categorías CIAT, observándose también que la mayor agrupación de las embarcaciones se dio principalmente dentro de la Zona Económica Exclusiva colombiana.



**Figura 9.** Distribución de los lances realizados por embarcaciones de diferentes clases CIAT. Se visualiza el alcance de los barcos clase CIAT- 2 (puntos blancos), CIAT-3 (puntos azules), CIAT-4 (puntos verdes), CIAT-5 (puntos naranja) y CIAT-6 (puntos rojos), resaltándose la Zona Económica Exclusiva colombiana (línea roja).

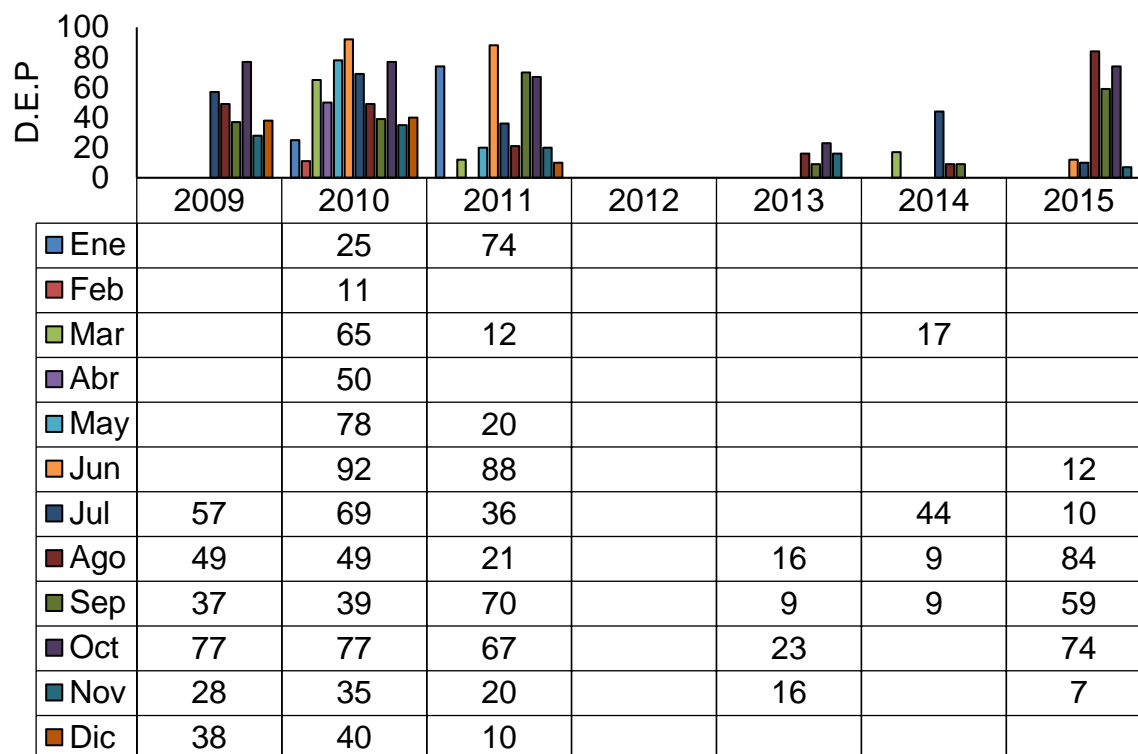
### 3.2. Características de las faenas atuneras y lances realizados

Al comparar la información reportada en las actas de desembarco, los registros de captura y de fauna marina, se pudo identificar información atípica representada por 2 faenas desarrolladas durante el año 2011, (< 2% de la información) (Tabla 5). El criterio de descarte de dichas faenas fue la no concordancia entre la información biológica-pesquera reportada en los tres registros mencionados, información corroborada adicionalmente con lo reportado en las bitácoras de los observadores. Adicionalmente se encontró ausencia de registros de actividad pesquera atunera para el año 2012.

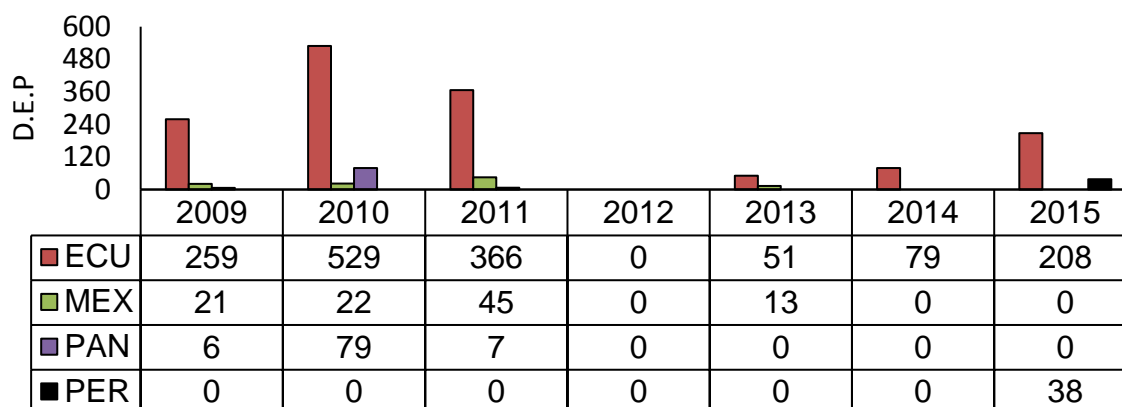
**Tabla 5.** Cantidad de faenas revisadas válidas y descartadas, según nacionalidad de embarcación.

País	Faenas válidas							Faenas descartadas		
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	País	Año	Total
ECU	30	51	36	--	4	6	16	ECU	2011	2
MEX	2	1	3	--	1	--	--	MEX	--	--
PAN	1	9	1	--	--	--	--	PAN	--	--
PER	--	--	--	--	--	--	3	PER	--	--
<b>Total</b>	<b>33</b>	<b>61</b>	<b>40</b>	<b>--</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>19</b>	<b>Total</b>		<b>2</b>

Entre 2009 y 2015 se registraron 3713 días de actividad, distribuidos entre 1723 Días Efectivos de Pesca - D.E.P (46.40%) y 1990 días destinados a la búsqueda del recurso o desplazamiento (53.60%). La mayor información de actividad pesquera se reportó para los años 2010 y 2011 (1048 D.E.P en total distribuidos en casi todos los meses del año), a comparación de los años 2013 y 2014 que acumularon 143 D.E.P (**Figura 10**).

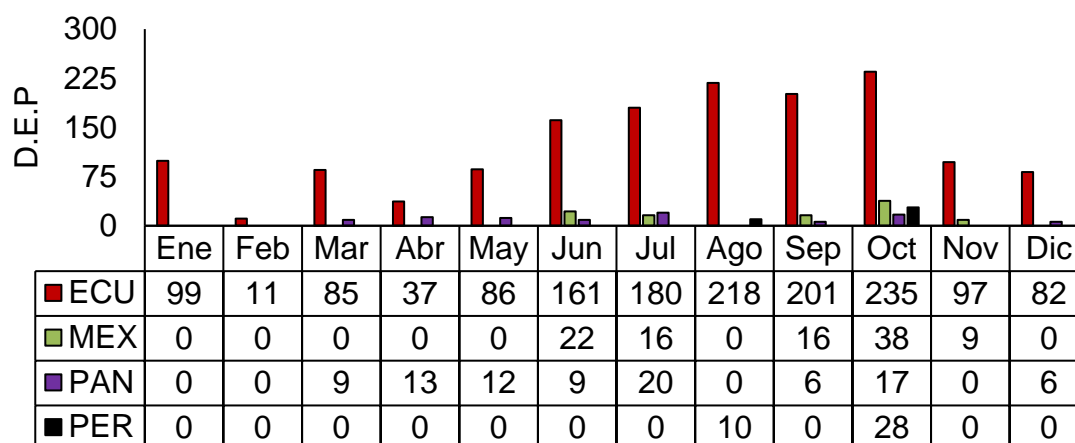

**Figura 10.** Distribución mensual de la cantidad días efectivos de pesca para las faenas atuneras entre 2009 y 2015.

Las embarcaciones de bandera ecuatoriana acumularon en total 1492 D.E.P y estuvieron presentes en todos los años revisados, acumulando mayor cantidad de D.E.P durante los años 2010 y 2011, contrastando con la flota peruana que solo fue reportada para el año 2015 (Figura 11).



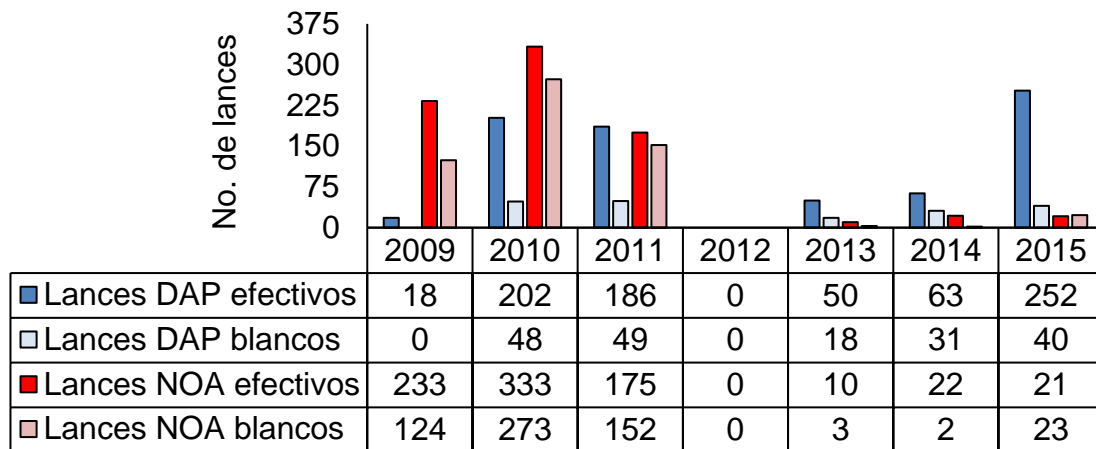
**Figura 11.** Distribución anual de los día efectivos de pesca según nacionalidad del barco.

La flota ecuatoriana también estuvo presente a lo largo de todos los meses, con mayor actividad pesquera entre junio y octubre, acumulando entre estos meses un total de 995 D.E.P (57.75 % de la información). Independientemente de la nacionalidad de la embarcación, febrero fue el mes con menor actividad pesquera (11 D.E.P.), mientras octubre fue el mes con la mayor cantidad de registros acumulando en total 318 D.E.P entre las cuatro nacionalidades (Figura 12).



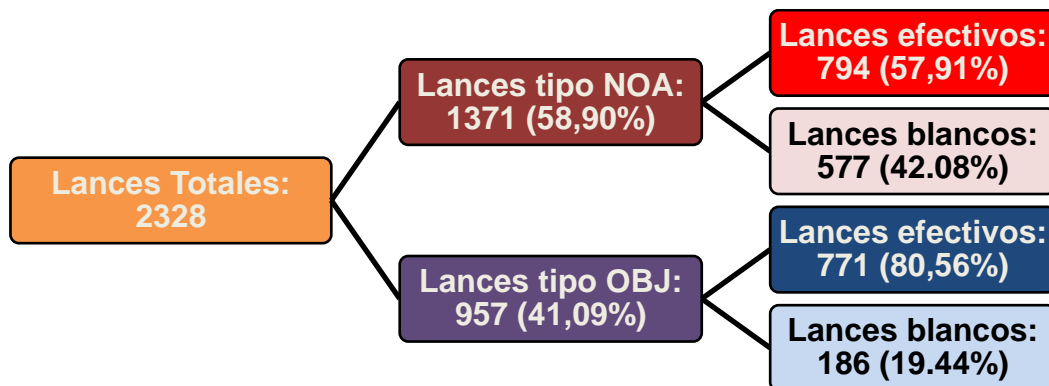
**Figura 12.** Distribución mensual de D.E.P para las faenas atuneras, entre 2009 y 2015.

Se contabilizó un total de 2328 lances, de los cuales el 58,90% correspondió a lances tipo NOA (1371 lances), siendo efectivo el 57.91% (794 lances). Se identificaron también 957 lances tipo DAP (41,09%), con una efectividad del 80.56% (771 lances). La preferencia por lances tipo NOA entre 2009 y 2015 disminuyó a partir del año 2011, situación opuesta a la observada para los lances sobre DAP. Se obtuvieron escasos registros para ambos tipos de lances para los años 2013 a 2015 y se identificó un incremento sostenido en los lances tipo DAP sobre los lances tipo NOA, llegando incluso a representar para el 2015 el 87 % de los tipos de lances efectuados por la flota pesqueras en la zona de estudio (Figura 13).



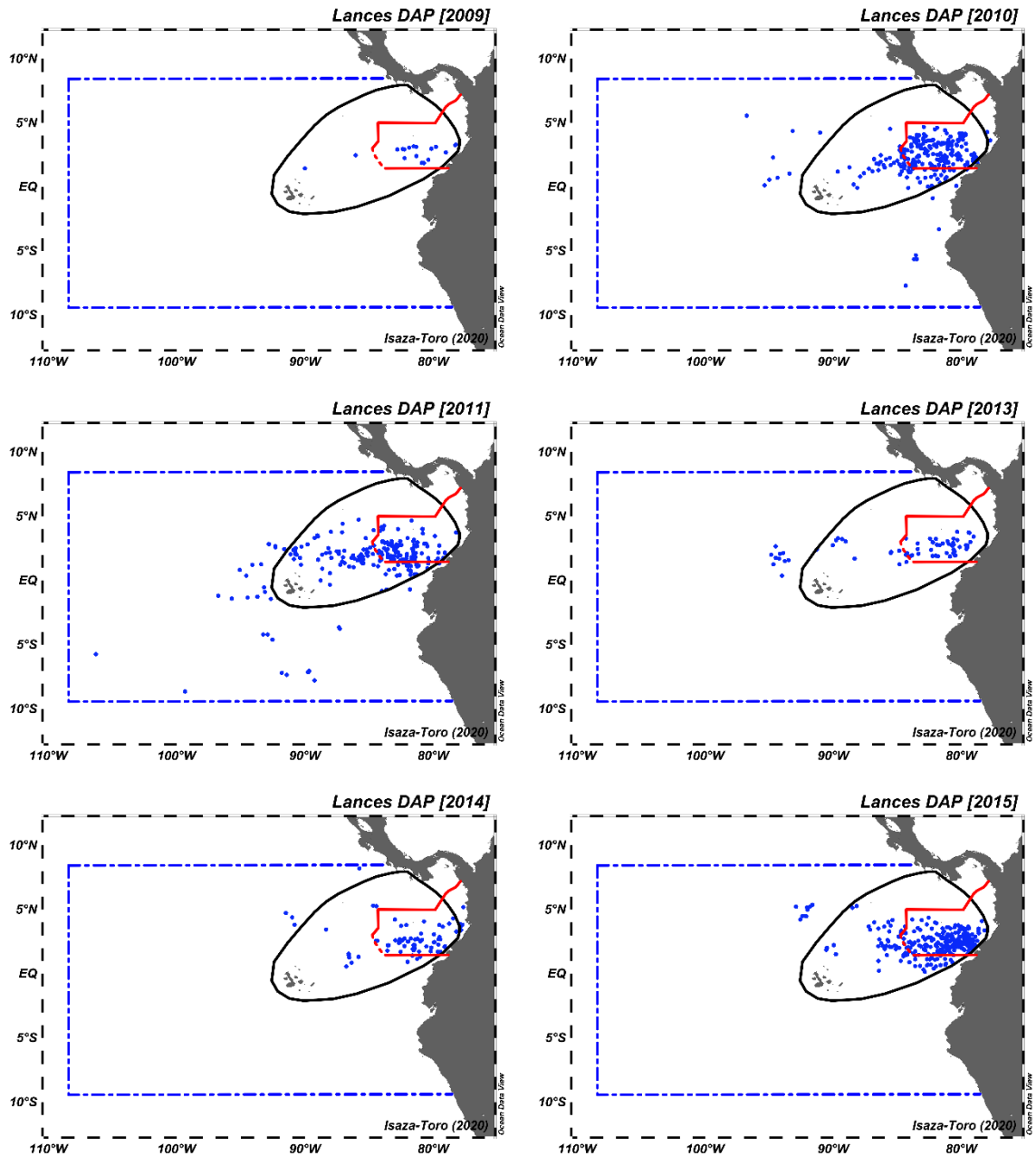
**Figura 13.** Efectividad y tipos de lances identificados entre 2009 y 2015.

En el siguiente diagrama, se resume la información anterior según los tipos de lances identificados (Figura 14).



**Figura 14.** Cantidad, efectividad y tipo de lances reportados por el POPC entre 2009 y 2015.

De forma general, los lances tipo DAP presentaron una mayor dispersión a comparación de los lances tipo NOA, circunscribiéndose principalmente al territorio colombiano del CMAR, aunque también se registraron lances en cercanías a Islas Galápagos (Ecuador), como se aprecia para los años 2010 y 2011 (Figura 15).



**Figura 15.** Distribución espacial anual de los lances tipo DAP, entre 2009 y 2015.

Los lances NOA también se ubicaron dentro del territorio colombiano del CMAR, aunque con una agregación más definida en frontera con Ecuador entre los 2 y 4 grados latitud norte y desde el borde costero hasta los 82 grados de longitud oeste. Los lances que alcanzaron mayores longitudes también se presentaron en los años 2010 y 2011, pero en menor cantidad a comparación de los lances tipo DAP (Figura 16).

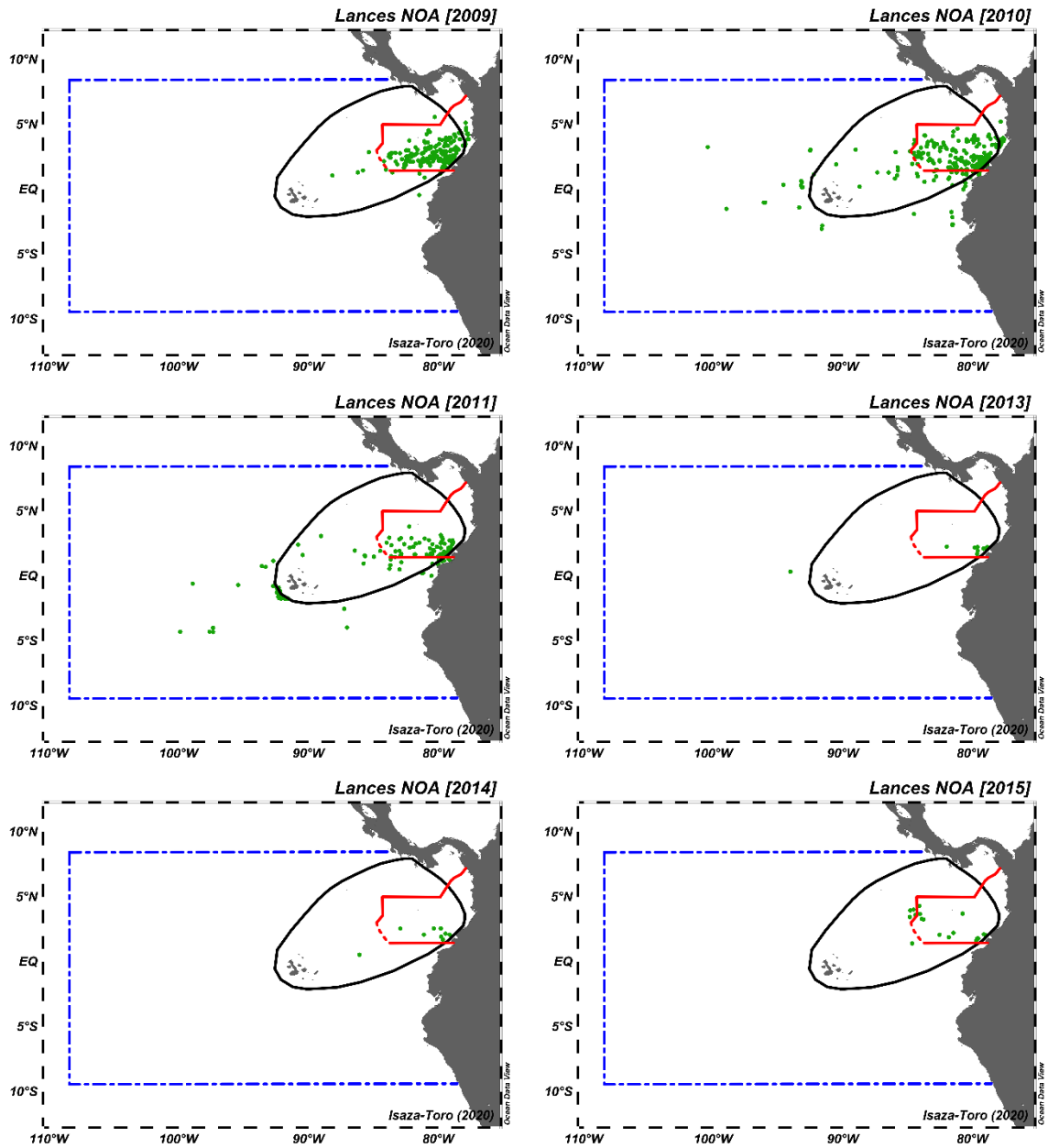
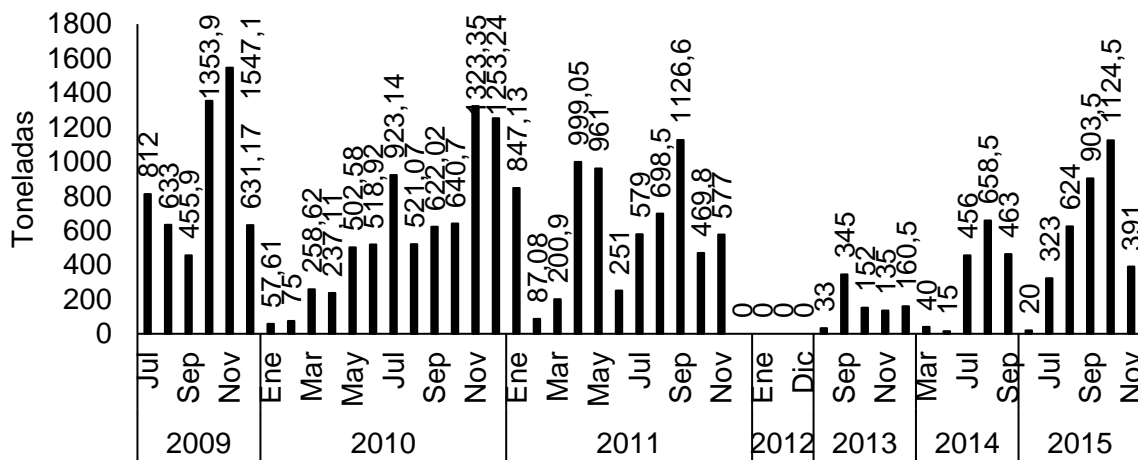


Figura 16. Distribución espacial anual de los lances tipo NOA entre 2009 y 2015.

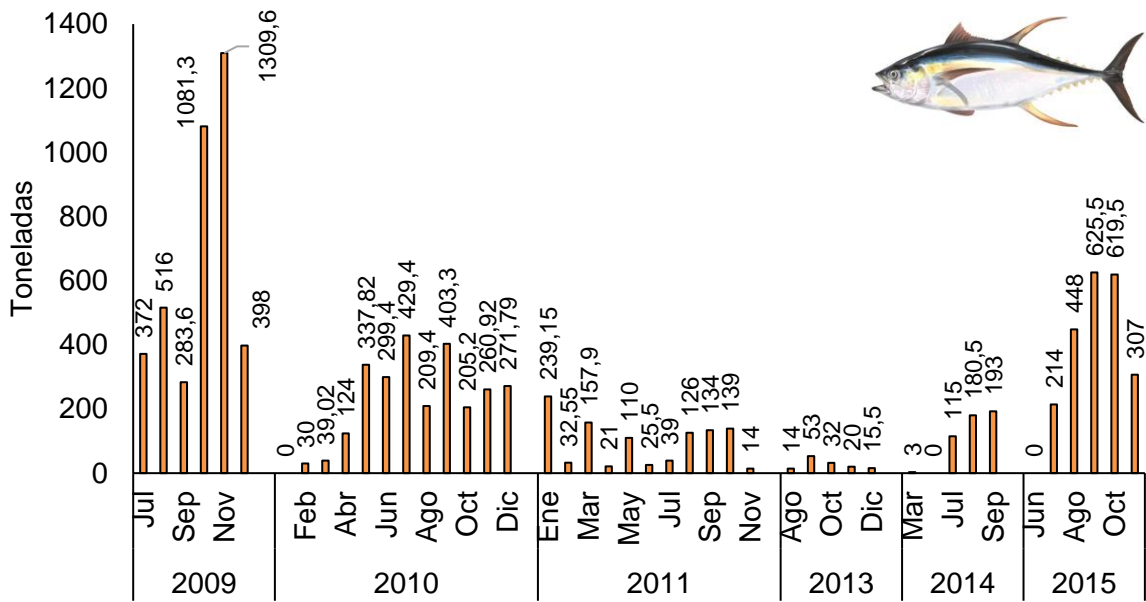
### 3.3. Descripción de la captura reportada.

E 76,74% del total de las toneladas de atún reportadas (19.163,49 t) correspondieron a las faenas desarrolladas entre los años 2009 al 2011, detectándose también un incremento progresivo de la captura desde el mes de junio hasta llegar al máximo reportado entre septiembre y octubre. Los primeros meses de cada año reportaron menor captura para todos los años, lo cual concuerda con lo descrito previamente para la actividad pesquera (Figura 17).

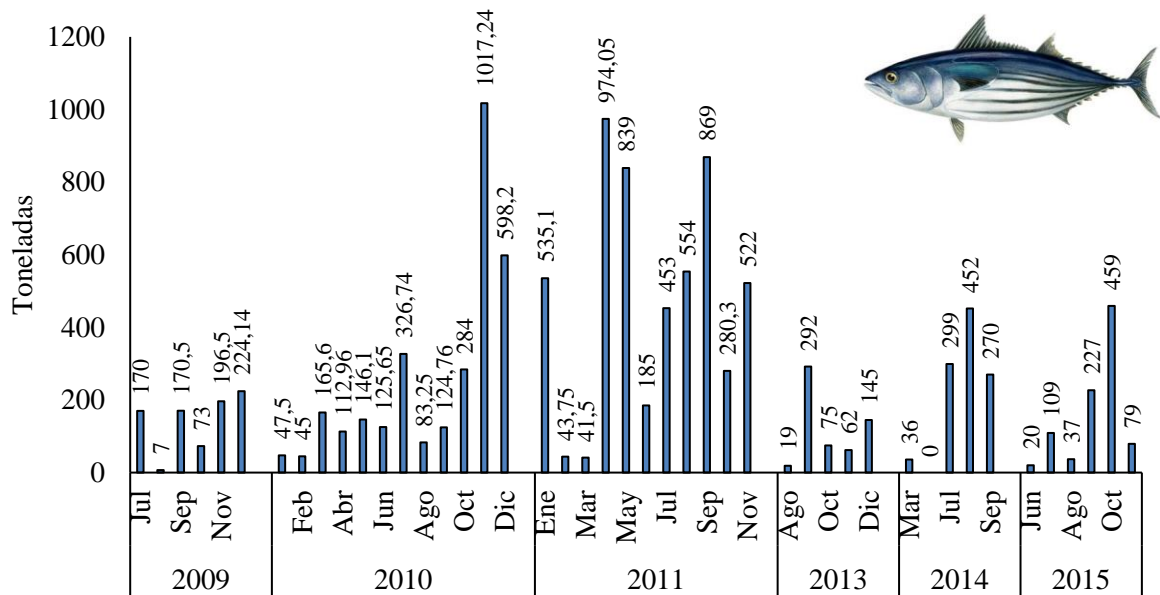


**Figura 17.** Distribución temporal de la captura acumulada reportada entre 2009 y 2015.

Las capturas reportadas correspondieron a *Thunnus albacares* (YFT), *Thunnus obesus* (BET), *Katsuwonus pelamis* (SKJ), *Euthynnus lineatus* (BKJ) y *Auxis rochei* (BLT), con una captura acumulada aproximada de 25.007,49 toneladas, de las cuales el 88,95% (22.244,69 t) está compuesto por YFT con 10.448,85 t y SKJ con 11.795,84 t. El 11,05 % restante, que equivale aproximadamente a 2763 toneladas, está distribuido entre las demás especies. La información de las capturas presentada en este capítulo no incluye las toneladas reportadas para las otras tres especies de atún: *Thunnus obesus*, *Euthynnus lineatus* y *Auxis rochei*, pero se puede consultar la información en el Anexo A. Para los años 2009 y 2015 se reportaron más toneladas de YFT (Figura 18), mientras que SKJ dominó las capturas desde el 2010 hasta el 2014 (Figura 19).



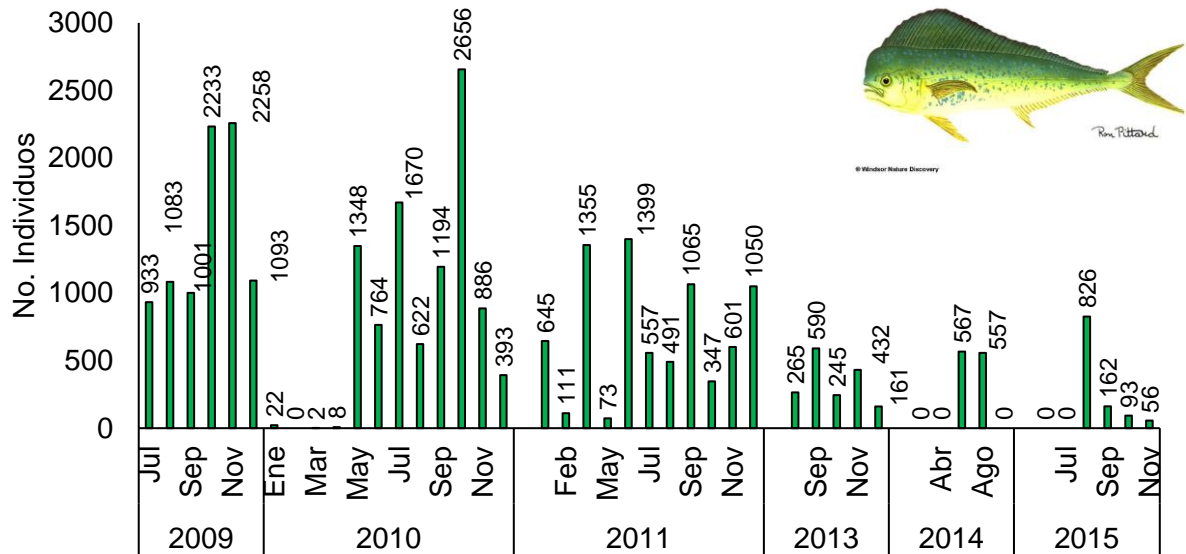
**Figura 18.** Distribución anual de la captura de YFT reportada por el POPC entre 2009 y 2015.



**Figura 19.** Distribución anual de la captura de SKJ reportada por el POPC entre 2009 y 2015.

Entre 2009 y 2015 se reportó la captura de 29.814 individuos de *Coryphaena hippurus* (DOL) obtenidos incidentalmente durante las faenas atuneras revisadas,

siendo el tercer y cuarto trimestre las épocas de mayor captura. Específicamente para los años 2009 y 2010 se registró la mayor cantidad de individuos, acumulando en ambos años 18.166 individuos, equivalente el 60.93% del total de las capturas reportadas (Figura 20).



**Figura 20.** Distribución temporal de la captura de dorado, entre 2009 y 2015.

### 3.4. Distribución espacial de la captura.

La distribución espacial de los lances con captura de cada una de las especies seleccionadas (YFT, SKJ y DOL), concuerda con lo descrito anteriormente para los tipos de lances identificados. Aunque no se observaron diferencias considerables que permitan identificar de manera preliminar, alguna preferencia de hábitat para cada una de las especies, las mayores capturas, se reportaron en la zona fronteriza entre Colombia y Ecuador (Figura 21). En el Anexo B, Anexo C y Anexo D se presenta con mayor detalle las distribuciones espaciales para las tres especies de interés.

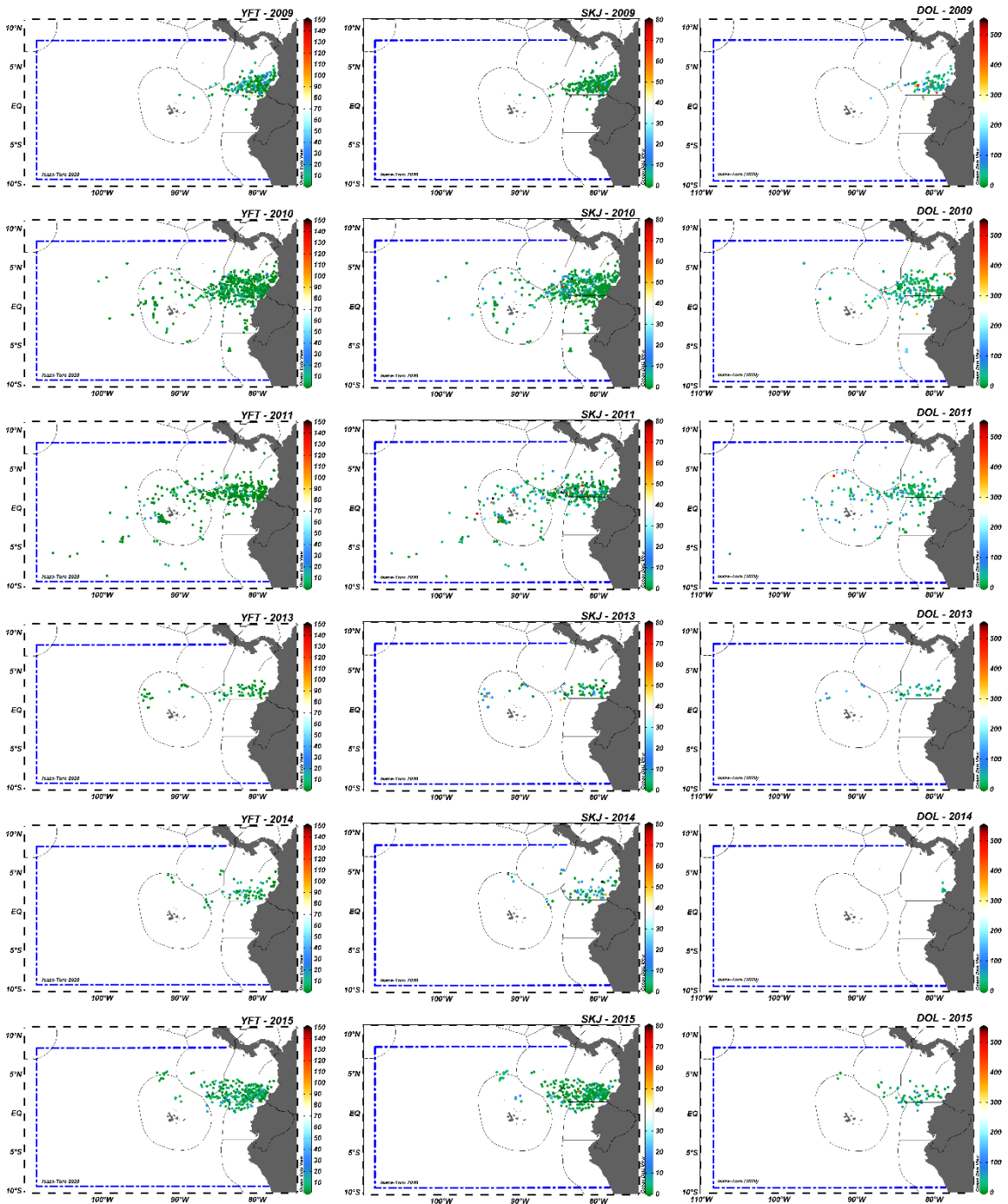
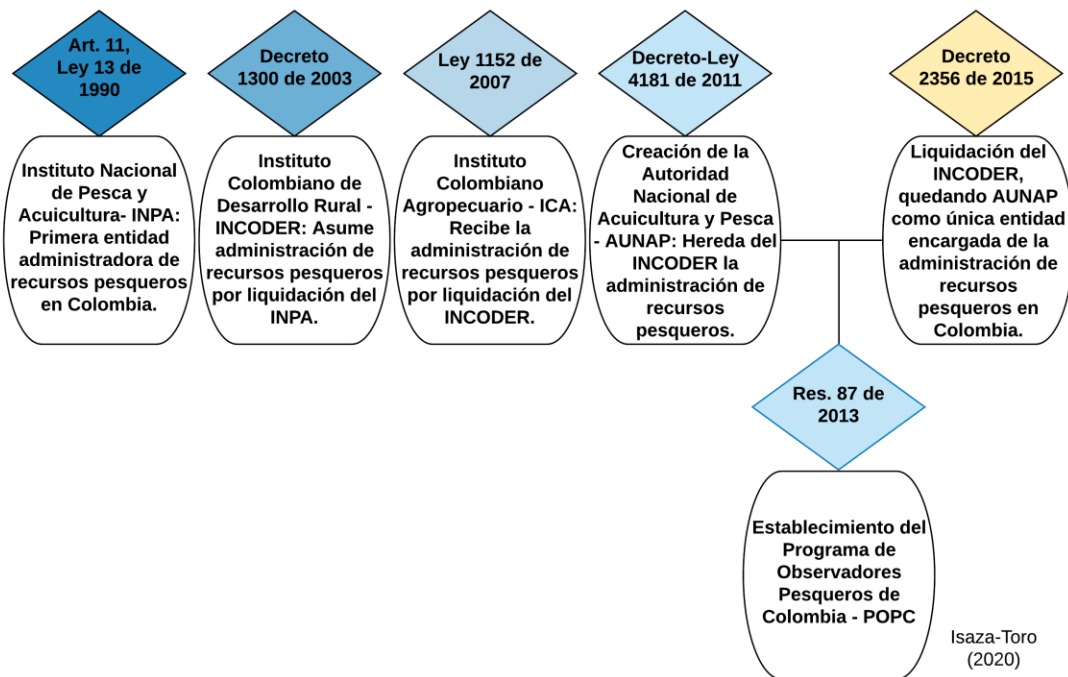


Figura 21. Distribución espacial anual de los lanzes efectivos por especie, entre 2009 y 2015.

## 4. Discusión

### 4.1. Sobre el Programa de Observadores Pesqueros de Colombia

La ausencia de información pesquera evidenciada para el año 2012 sería consecuencia de los cambios en la administración de los recursos pesqueros nacionales, situación reportada ya reportada para otros estudios (Díaz-Ochoa & Quiñones, 2008; Herrón, Mildenerger, Díaz, & Wolff, 2018) y que también habría afectado la continuidad del POPC, tal y como se ilustra en la Figura 22.



**Figura 22.** Cronología de los cambios administrativos en la autoridad pesquera colombiana.

A pesar de lo anterior, el POPC es un esfuerzo institucional vigente que recopila información biológico-pesquera que permite proyectar una perspectiva parcial sobre la dinámica pesquera del atún en el POT. Con la información del POPC, es posible describir la distribución espaciotemporal de la actividad pesquera

desarrollada por flota extranjera cerquera de menor clase según su nacionalidad, así como conocer las especies de atunes de interés comercial con mayor captura en el territorio marítimo de Colombia. Hasta el momento, estos resultados presentan características de las faenas y capturas de atún similares a lo reportado en otros estudios (Arias Isaza et al., 2015; Díaz, Vieira, & Melo, 2011; IATTC, 2013), por lo cual esta información podría ser la base de futuros análisis de la dinámica pesquera del atún en función de variables ambientales en condiciones presentes y futuras en Colombia (Herrera Montiel, Coronado-Franco, & Selvaraj, 2019; Lehodey, Senina, Calmettes, Hampton, & Nicol, 2013; Sánchez-Carnero, Rodríguez-Pérez, Couñago, Le Barzik, & Freire, 2016), contribuyendo así a la formulación de políticas públicas enfocadas al aprovechamiento sustentable de este recurso a escala nacional y regional.

#### 4.2. *Sobre las capturas reportadas y tipos de lance identificados.*

La concentración de lances dentro de la ZEE colombiana en el et-POT estaría favorecida por el constante ingreso de nutrientes alóctonos a través de la descarga de ríos de gran caudal como el Patía y Mira (Restrepo Ángel, 2008), así como la presencia permanente de remolinos de diferente duración, temperatura y dirección (Isaza-Toro, Rodriguez, & Rueda, 2015; Selvaraj et al., 2011). Estas condiciones podrían ser determinantes para la permanencia de caladeros en la frontera entre Colombia y Ecuador, los cuales se conocen como “Banco Tumaco”, “Pasacaballos” y “Banco Colombia”(Rueda et al., 2011; Selvaraj et al., 2011) y parecen ser el objetivo principal de los lances tipo NOA. Por otra parte, la presencia de lances ubicados en áreas más oceánicas estarían favorecidos por la productividad primaria dependiente de afloramientos oceánicos como los registrados en cercanía a Islas Galápagos (Harpp, Mittelstaedt, D’Ozouville, & Graham, 2014; Pennington et al., 2006), así como por procesos migratorios de la Zona de Convergencia Intertropical, el chorro de Panamá y frentes oceánicos (Asto, Chaigneau, & Gutiérrez, 2019) que favorecen la presencia de presas de interés para los atunes,

peces que se caracterizan por su alta capacidad de predación y voracidad (Varela, Intriago, Flores, & Lucas-Pilozo, 2017).

La mayor dispersión en la distribución espacial de los lances DAP dentro del CMAR puede deberse, por una parte, al uso de carnada como factor complementario al plantado, situación que aseguraría la captura de atunes y posiblemente de otras especies, independiente de la posición del lance. Los observadores a bordo registraron que la composición de la carnada incluía principalmente pelágicos pequeños como *Auxis rochei*, aunque para algunos DAPs se incluyeron restos de ballenas, lobos marinos y tortugas muertas (Castro, Van Waerebeek, Cárdenas, & Alava, 2020). El incremento de uso de estos dispositivos en la zona de estudio es preocupante, ya que el CMAR es un instrumento diseñado para promover la conservación y uso sostenible de la diversidad biológica de la región Pacífico Tropical Oriental – POT (CCO, 2014). Esta zona se cataloga además como un Área Marina de Importancia Ecológica o Biológica- EBSA (CBD, 2013) cuyo principio es la conexión ecológica entre las islas Galápagos, Coiba, del Coco, Malpelo y Gorgona, las cuales a su vez hacen parte de la Red Regional de Áreas Costeras y Marinas Protegidas del Pacífico Sudeste (CPPS, 2010). Dicha conectividad sugiere el desarrollo de procesos biológicos y físicos que conectan especies y ecosistemas entre estas localidades a través de las corrientes marinas (Briggs, 1961; Calle-Bonilla et al., 2017; Z. M. Hu & Fraser, 2016) y rutas migratorias de especies, incluidas las de interés comercial (Boustany, Matteson, Castleton, Farwell, & Block, 2010b; Fujioka et al., 2018). En ese orden de ideas, el uso de los *plantados* como complemento a las faenas atuneras podría influir significativamente en los propósitos planteados para el CMAR como territorio de importancia ecológica y estos dispositivos podrían estar funcionando como una trampa ecológica para estas poblaciones de peces, además de que podrían estar alterando las rutas migratorias de diferentes especies pelágicas (Dagorn, Holland, & Filmalter, 2010; Tolotti et al., 2020) .

Por otra parte, la mayor presencia de DAPs en aguas territoriales de Colombia estaría asociado con el patrón general de circulación superficial que ha sido

descrito para esta zona (Fiedler & Talley, 2006a; Lavín et al., 2006). Al parecer, las embarcaciones atuneras aprovechan el flujo oriental de corrientes subsuperficiales con el fin de desplegar los DAPs, los cuales son transportados hasta proximidades de las zonas de pesca ubicadas en frontera colombo-ecuatoriana (Moreno et al., 2016). Lo anterior ha sido mejorado con la instalación de equipos de georreferenciación como boyas satelitales que garantizarían el seguimiento y ubicación del plantado, informando a los pescadores la presencia de biomasa y estimando posiblemente sus toneladas de peso (Scott Fishery Consultants, 2014), con lo cual se estaría invirtiendo menos tiempo y combustible en la búsqueda del recurso, garantizando así el éxito de la captura con menor esfuerzo, representado esto último en la poca cantidad de lances sin captura realizados sobre DAPs.

Referente al uso de plantados en Colombia, en el año 2008 el ICA prohibió de manera explícita cualquier actividad pesquera sobre los dispositivos de agregación por parte de embarcaciones nacionales y extranjeras afiliadas a empresas nacionales. Esta reglamentación aplicaba no solo para la ZEE colombiana, también restringía la pesca con plantado en el territorio comprendido entre 94°00' - 110°00' O y 3°00' N y 5°00' S (ICA, 2008). Sin embargo, la medida fue derogada debido a los cambios administrativos descritos previamente. Actualmente, la autoridad pesquera colombiana implementó el procedimiento para recolección y análisis de información referente a faenas de pesca de embarcaciones nacionales y extranjeras autorizadas, asociadas con dispositivos agregadores de peces en el POT (AUNAP, 2014).

## **5. Conclusiones y recomendaciones**

### *5.1. Sobre el Programa de Observadores Pesqueros de Colombia*

El POPC es un esfuerzo institucional vigente que recopila información biológico-pesquera que permite proyectar una perspectiva parcial sobre la dinámica

pesquera del atún en el et- POT. Con la información del POPC, es posible describir la distribución espaciotemporal de la actividad pesquera desarrollada por flota extranjera cerquera de menor clase según su nacionalidad, así como conocer las especies de atunes de interés comercial con mayor captura en el territorio marítimo de Colombia y la cantidad y especies capturadas incidentalmente. Sin embargo, existen importantes vacíos de información dada la interrupción del monitoreo por temas administrativos. Dada la importancia del POPC como fuente de información, se recomienda asegurar los recursos económicos y capital humano que permitan dar continuidad a la toma de información, análisis y gestión documental.

## 5.2. *Sobre la captura y tipos de lance reportados por el POPC*

Las toneladas analizadas en este estudio y la alternancia en el tiempo entre las dos especies de atún que predominan en las faenas cerqueras pueden dar una idea de la posible tendencia temporal de esta pesquería en el et-POT. La principal ventaja de haber basado los análisis de esta tesis en los registros del POPC radica en que se usaron los documentos originales, diligenciados por los observadores a bordo de cada faena, con las coordenadas de lance reales, sin ningún proceso de estandarización o control de calidad que pudiera alterar las posiciones, tipos de lance, especies y cantidades reportadas. Además, el conjunto de formularios y documentos que acompañaron cada faena permitió hacer un análisis integral de la actividad realizada (en tiempo y espacio), con un nivel de detalle exclusivo no reportado anteriormente en ningún estudio. Al tratarse de información inédita y sin ningún tipo de modificación, fue posible diseñar una metodología específica para procesar y analizar dichos registros de forma precisa para esta tesis.

Poder diferenciar entre los lances realizados sobre atunes de natación libre (NOA) y aquellos capturados con lances sobre elementos de agregación como los DAPs, permitió seleccionar un subconjunto de datos (NOA) con el menor sesgo posible, favoreciendo así que los modelos de distribución potencial de los atunes y dorados respondieran a los predictores ambientales principalmente. Emplear los registros de presencia de lances sobre DAPs podría no reflejar los posibles cambios en el

rango de distribución frente a cambios ambientales dado que estos dispositivos utilizan carnadas para atraer a los peces.

A pesar de las ventajas ofrecidas por la información inédita del POPC, el total de la captura reportada por dicho programa podría no reflejar fielmente la cantidad y distribución espacial del recurso atún y dorado a escala nacional y regional para la ventana de tiempo 2009-2015, dado que:

- Se excluye la información de la flota atunera cerquera colombiana pues esta es monitoreada por el Programa Nacional de Observadores de Colombia - PNOC. Aunque la información biológico-pesquera del PNOC es la base para la toma de decisiones nacionales en materia de pesquerías de atún, los registros de dicho programa que están disponibles al público en la página de internet de la Comisión Interamericana del Atún Tropical tienen un post-procesamiento que incluye la estandarización espacial, además no se ofrecen los reportes complementarios a dichos registros (los formularios de especies capturadas incidentalmente diferentes a picudos y tiburones y bitácoras de los observadores a bordo son excluidos). Estos reportes complementarios garantizarían un análisis de contexto más acertado y completo para cada una de las faenas atuneras realizadas en el et-POT. Poder acceder a los registros originales del PNOC y aplicar una metodología de análisis diseñada exclusivamente para esta información, permitirían estimar la cantidad de atún y capturas incidentales de forma más acertada pues dichos registros deberían considerarse complementarios a la información adquirida en el marco del POPC.

### 5.3. *Sobre los Dispositivos Agregadores de Peces*

El uso de los DAPs reportados por el POPC sigue la tendencia mundial de aumento reportada por las diferentes Organizaciones Regionales de Ordenamiento Pesquero - OROPs, pero se necesitan estudios complementarios y detallados que permitan analizar de manera integral y en el tiempo, las consecuencias del uso de

estos dispositivos en el et-POT. Se recomienda el planteamiento y ejecución de políticas nacionales de control y uso de estos dispositivos en las faenas atuneras dados los posibles impactos negativos en los recursos pesqueros. Lo anterior cobra especial importancia al recordar que las faenas atuneras monitoreadas por el POPC ocurrieron al interior de una zona de importancia ecológica como lo es el Corredor CMAR y que el 80.56% de los lances realizados sobre DAPs fue efectivo, frente al 57.91% de efectividad registrada para los lances tipo NOA.

Desde el 30 de noviembre hasta el 04 de diciembre del 2020, se desarrolló la 95ª reunión anual de la CIAT en la cual Colombia presentó una propuesta enfocada en el fortalecimiento de las medidas de conservación y sostenibilidad de las poblaciones de atunes tropicales y especies incidentales, estas últimas en especial riesgo dado el incremento en el uso de DAP. El propósito principal de esta propuesta consiste en un plan de manejo a tres años que pretende reducir el número máximo de DAP por embarcación, además de limitar la reactivación y desactivación remota de los “plantados”. Adicionalmente, se propone la entrega de la información no procesada de las boyas georreferenciadoras que hacen parte de los DAP. El objetivo final de lo anterior consiste en poder hacer un análisis más acertado del estado de las pesquerías, propuesta directamente alineada con las recomendaciones del personal técnico de la CIAT, el Comité Asesor y el Grupo de Trabajo sobre Plantados, las cuales se socializaron en la Resolución C-17-02 (MADS, 2020).

La descripción preliminar del uso de los dispositivos agregadores presentada en esta tesis puede considerarse un aporte sin precedentes en el país pues está alineada con lo propuesto en la 95ª de la CIAT, razón por la cual se recomienda profundizar en investigaciones que permitan tener análisis espaciotemporales del uso de estos dispositivos y sus impactos sobre el ecosistema pelágico.

---

# Capítulo 2: Revisión diagnóstica de las fuentes de información ambiental marina

## 1. Introducción

Existen diferentes metodologías, instrumentos y programas de monitoreo enfocados al estudio de las condiciones ambientales marinas, los cuales incluyen desde cruceros oceanográficos hasta la modelación numérica. La información obtenida durante los cruceros oceanográficos ha contribuido históricamente con la caracterización de entornos marinos a escala global (Emery & Meincke, 1986; Levitus, 1982; Svedrup, Johnson, & Fleming, 1942), además de favorecer la comprensión de la dinámica marina y poblacional de diferentes grupos taxonómicos (Calle-Bonilla et al., 2017; Félix et al., 2011; Isaza-Toro, 2013; Palacios et al., 2012; Rodríguez Rubio & Giraldo, 2011; Valencia & Giraldo, 2012). Con el objetivo de mejorar la cobertura espacial y temporal del monitoreo de las condiciones ambientales, en la década de los años setenta inició la era del sensoramiento remoto aplicado al entorno ambiental marino (Apel, 1997; D. Reidel Publishing Company, 1973). A la fecha, es posible analizar el comportamiento de la temperatura del agua y el color del océano (Alonso, Blázquez, Isaza-Toro, & Vidal, 2015; Coronado-Franco, Selvaraj, & Mancera Pineda, 2018), la altura del nivel del mar, circulación oceánica y oleaje (Chelton, Schlax, Lyman, & Johnson, 2003; Portilla, Caicedo, Padilla-Hernández, & Cavaleri, 2015; Rodríguez-Rubio, Schneider, & Abarca del Río, 2003), así como cambios en la línea de costa y cobertura vegetal (Restrepo & Cantera, 2013) a partir de datos adquiridos satelitalmente. Sin embargo, aunque se logre una mayor cobertura espaciotemporal, la información satelital se adquiere principalmente a nivel superficial, lo cual es una desventaja si se pretende estudiar los cambios

oceanográficos en la columna de agua (Chavez, Buck, Service, Newton, & Barber, 1996; D’Croz & O’Dea, 2007). Gracias al avance tecnológico y con el propósito de predecir los cambios ambientales marinos proyectados diferentes escalas de tiempo, los investigadores desarrollaron la modelación oceanográfica, la cual incluye asimilación y ajuste de datos ambientales como los adquiridos por sensoramiento remoto (Toyoda et al., 2015) o muestreo *in situ* (Cayocca et al., 2014). Actualmente, es posible modelizar la propagación del oleaje (Osorio et al., 2014), al igual que cambios de temperatura, corrientes y salinidad a varios niveles de profundidad (Liu, Xie, Morrison, & Kamykowski, 2013). A pesar de los avances en las técnicas de muestreo y análisis oceanográficos, el monitoreo de información ambiental marina a diferentes escalas y niveles de profundidad sigue siendo un reto para los oceanógrafos (van Haren, 2018). Para el Pacífico Oriental Tropical - POT, los esfuerzos de monitoreo de condiciones ambientales marinas se han basado principalmente en el uso de sondas multiparamétricas, estaciones fijas y sensoramiento remoto (Corredor-Acosta, Acosta, Pizarro-Koch, Medell, & Sald, 2020; Devis-Morales, Schneider, Montoya-Sánchez, & Rodríguez-Rubio, 2008; Garcés-Vargas, Schneider, Abarca del Río, Martínez, & Zambrano, 2005).

El POT se caracteriza por tener aguas cálidas y baja salinidad superficial, se ubica entre los giros subtropicales del Pacífico Norte y Sur y presenta una productividad primaria asociada principalmente con afloramientos oceánicos, como los desarrollados cerca de las Islas Galápagos (Harpp et al., 2014; Pennington et al., 2006), aunque también recibe un permanente ingreso de nutrientes alóctonos a través de la descarga de ríos como el Patía y Mira (Restrepo Ángel, 2008). Se limita por las corrientes costeras de California en el norte, Humboldt en el sur y la presencia del Frente Ecuatorial, el cual constituye el punto de encuentro de masas de agua cálidas y de baja salinidad con otras de menor temperatura y mayor salinidad (Fiedler & Talley, 2006b; Kessler, 2006; Pak & Zaneveld, 1974). El POT es también una zona fuertemente afectada por variaciones de diferente escala relacionadas con el desarrollo del fenómeno océano-atmosférico El Niño Oscilación del Sur - ENSO y la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical - ZCIT. La ZCIT representa el punto de encuentro de los vientos alisios del noreste

y sureste, caracterizándose por ser una franja de baja presión, alta nubosidad y humedad (Amador, Alfaro, Lizano, & Magaña, 2006). En el POT, esta franja oscila alcanzando su máxima posición septentrional entre los meses de julio y octubre y meridional entre enero y abril (Xie, Xu, Kessler, & Nonaka, 2005). Estos desplazamientos son acompañados por la presencia de aguas de menor temperatura entre enero y marzo, contrastando con un aumento en la temperatura del agua entre julio y septiembre (Rodríguez-Rubio et al., 2003; Xie et al., 2005). Además de la migración de la ZCIT, el desarrollo del fenómeno ENSO en el POT trae como consecuencia el aumento de la temperatura del agua y profundización de la termoclina durante la fase cálida o Niño, siendo lo opuesto para las fases Niña (Wang & Fiedler, 2006). Se ha sugerido que la relación entre la migración de la ZCIT y las pesquerías es indirecta y se debe principalmente a la pluviosidad y cambios en la dirección e intensidad de los vientos alisios (Díaz-Ochoa & Quiñones, 2008; Donguy & Henin, 1980). Sin embargo, el ENSO es el fenómeno océano-atmosférico más estudiado pues se asocia con cambios ambientales más extremos con consecuencias económicas y ambientales de mayor magnitud a diferentes escalas (French, Mechler, Arestegui, MacClune, & Cisneros, 2020; Sun, Chiang, Tsoa, & Chen, 2006). En ese orden de ideas y considerando los antecedentes presentados, cualquier estudio que contribuya a una mejor comprensión de los cambios ambientales en el entorno marino en el POT permitirá generar estrategias que permitan amortiguar de manera más acertada cualquier posible consecuencia sobre las pesquerías y su cadena comercial. Sin embargo, los estudios basados en cambios en las condiciones ambientales marinas requieren información ambiental que cubra espacial y temporalmente el área de estudio, por lo cual se presenta en este capítulo una revisión diagnóstica de la información oceanográfica *in situ* disponible y las razones para no incluirla dentro de la metodología de esta tesis.

## 2. Materiales y Métodos

Las variables ambientales en la ubicación correcta y que sean lo suficientemente precisas son las idóneas para determinar un nicho de especie lo más cercano posible a sus necesidades ecofisiológicas (Guisan, Thuiller, & Zimmermann, 2017). Por esta razón, la cobertura y resolución espaciotemporal fueron los principales criterios considerados para la selección de las variables oceanográficas empleadas en la estimación de distribuciones potenciales de especies en condiciones actuales, así como aquellas proyectadas en escenarios de cambio climático. Para la proyección de las distribuciones en escenarios de cambio climático se consideró el *Assessment Report No. 5* emitido por el Panel Internacional de Cambio Climático (IPCC). En este reporte se presentan nuevos escenarios de cambio climático conocidos como *Representative Concentration Pathways* - RCP, los cuales se agrupan en cuatro categorías: RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6 y RCP 8.5, representando así parte del balance global de energía (Forzamiento Radiativo-FR) medido en  $\text{watts/m}^2$ , proyectados entre los años 2011-2050 y 2011-2100 (IPCC, 2014b), información resumida en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Resumen de los escenarios de cambio climático RCPs.

RCP	Trayectoria del FR	Cambio de Temperatura [°C]	Rango acumulado de CO <sub>2</sub> [GtCO <sub>2</sub> ]	
			[2011 - 2050]	[2011 - 2100]
<b>Ventana de tiempo</b>		2100	[2011 - 2050]	[2011 - 2100]
<b>8.5*</b>	Aumento	4.1 - 4.8	1840 – 2310	5350 – 7010
<b>6</b>	Estable	3.1 - 3.7	1570 – 1940	3620 – 4990
<b>4.5</b>	Estable	2.3 - 2.9	1260 – 1750	1870 – 3340
<b>2.6</b>	Descendente	1.5 - 1.7	550 – 1300	630 – 1180

Considerando lo anterior, se revisaron las siguientes fuentes de información ambiental marina con el propósito de identificar aquella que cumpliera con los requisitos indicados:

➤ Cruceros Oceanográficos del Estudio Regional del Fenómeno de El Niño-ERFEN:

El programa ERFEN es un esfuerzo regional conjunto en el cual participan Colombia, Ecuador, Perú y Chile. En Colombia este compromiso está a cargo de la Dirección General Marítima – DIMAR y se cumple mediante el desarrollo de cruceros de investigación (DIMAR, 2008). Se accedió a la información oceanográfica colombiana a través del Centro Colombiano de Datos Oceanográficos – CECOLDO (DIMAR, 2012), haciendo una búsqueda específica para la región pacífico desde la fecha de establecimiento del ERFEN como programa de monitoreo (CPPS, 1992).

➤ Base Mundial de Datos Oceánicos (World Ocean Database - WOD):

Es generada por el Centro Nacional de Información Ambiental de la Agencia Nacional Oceánica y Atmosférica – NOAA (siglas en inglés), e incluye conjuntos de datos de diferentes variables oceanográficas adquiridos con diferentes instrumentos de medición (Boyer et al., 2018). Lo anterior hace que el WOD sea un referente importante para el desarrollo de estudios oceanográficos a escala global y regional (Reagan, Boyer, Antonov, & Zweng, 2014; Seidov, Mishonov, Reagan, & Parsons, 2019). Los datos oceanográficos disponibles al público se agrupan por cuadrante geográfico, año, e instrumentos de medición, los cuales se resumen en la Tabla 7 (Garcia, Boyer, Locarnini, Baranova, & Zweng, 2018).

**Tabla 7.** Instrumentos de medición y términos WOD.

<b>Término</b>	<b>Instrumentos o técnica</b>
<b>WOD</b>	
<b>OSD</b>	<b><i>Ocean Station Data:</i></b> datos de baja resolución de sondas multiparamétricas y datos planctónicos.
<b>MBT</b>	<b><i>Mechanical Bathythermographs:</i></b> Datos de batitermógrafos mecánicos, digitales y microbatitermógrafos.
<b>CTD</b>	<b><i>Conductivity – Temperature-Depth:</i></b> Datos CTD de alta resolución.
<b>XBT</b>	<b><i>Expendable Bathythermograph:</i></b> Datos de alta y baja resolución de batitermógrafos.

<b>PFL</b>	<b>Profiling floats:</b> Plataformas flotantes a ciertas profundidades que emergen eventualmente. Proyecto ARGO: <a href="http://www.argo.ucsd.edu/">http://www.argo.ucsd.edu/</a>
<b>MRB</b>	<b>Moored Buoys:</b> Datos de instrumentos asociados a boyas flotantes estables. Proyecto Global tropical moored buoy array: <a href="https://www.pmel.noaa.gov/qtmba/">https://www.pmel.noaa.gov/qtmba/</a>
<b>DRB</b>	<b>Drifting buoys:</b> Información adquirida por boyas de deriva. Proyecto: Global Drifter Program: <a href="https://www.aoml.noaa.gov/phod/gdp/index.php">https://www.aoml.noaa.gov/phod/gdp/index.php</a>
<b>APB</b>	<b>Autonomous Pinniped Bathythermographs:</b> Información adquirida durante inmersiones de pinnípedos (género <i>Mirounga</i> ).
<b>UOR</b>	<b>Undulating Oceanographic Recorders:</b> Datos adquiridos con instrumentos remolcados: CTD's por ejemplo.
<b>GLD</b>	<b>Gliders:</b> Información muestreada mediante el uso de Vehículos Autónomos Submarinos (AUV's) que se desplazan entre la superficie y la profundidad programada.
<b>SUR</b>	<b>Surface:</b> Datos adquiridos superficialmente. NO son el propósito del WOD, a menos que sea información concreta de una época precisa o si no hay más info.

El acceso a la información del WOD se hizo directamente desde el Centro Nacional de Datos Oceánicos – NODC (siglas en inglés) de la NOAA (Consulta en internet: [:https://www.nodc.noaa.gov/OC5/indprod.html](https://www.nodc.noaa.gov/OC5/indprod.html)), seleccionando todos los instrumentos de medición disponibles para la zona de estudio.

➤ Atlas Mundial de los Océanos (World Ocean Atlas - WOA).

También es un producto de la NOAA y contiene información climatológica calculada para diferentes resoluciones espaciales dependiendo de la climatología de interés (5 grados, 1 grado y ¼ de grado). Además, las climatologías disponibles pueden ser anuales, mensuales o estacionales para diferentes ventanas decadales. Los cálculos climatológicos se realizan a partir de información del WOD y las variables oceanográficas disponibles son temperatura, salinidad, oxígeno, fosfato, nitrato y silicato (Garcia et al., 2019). Esta información puede ser consultada a través del enlace <https://www.nodc.noaa.gov/OC5/indprod.html> >> *World Ocean Atlas 2018* (última versión disponible y actualizada). Para este estudio se seleccionó el promedio decadal calculado para la ventana de tiempo 2005 y 2017, espacializado en celdas de ¼ de grado latitud/longitud.

➤ Espectrorradiómetro de Imágenes de Media Resolución (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer* – MODIS Aqua):

Pertenece al creciente grupo de sensores remotos a bordo de artefactos aeroespaciales y se presenta en esta revisión únicamente para ejemplificar la cobertura espacial y temporal que ofrecen los sensores remotos existentes. Los sensores MODIS monitorean variables ambientales globales como la temperatura (Hosoda, Murakami, Sakaida, & Kawamura, 2007) y color del océano (Racault et al., 2017). Se seleccionaron imágenes satelitales adquiridas con el sensor MODIS-Aqua para un día, acumuladas para 8 días y para un mes, a resolución espacial aproximada de 4 km. Las imágenes se descargaron de la página *Ocean Color Web* (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>), seleccionando los máximos niveles de procesamiento (L3), nivel previo a procesos de modelado y análisis complementarios (Earth Observing System Data and Information System, 2019).

➤ Variables ambientales Bio-ORACLE:

El portal de Bio-ORACLE (disponible en: <http://www.bio-oracle.org>) ofrece información específica para la estimación de distribuciones de especies en entornos marinos (Bosch, Tyberghein, Deneudt, Hernandez, & De Clerck, 2018; Tyberghein et al., 2012), además de ofrecer capas ambientales en diferentes periodos de tiempo: condiciones iniciales (2000-2014), futuro cercano (2040-2050) y futuro distante (2090-2100), acorde con los RCP propuestos en el AR5 del IPCC (Assis et al., 2018). El escenario de cambio climático escogido fue el más drástico: RCP 8.5 (Hayhoe et al., 2017), el cual se caracteriza por el máximo aumento de la temperatura ambiental, mayor concentración de dióxido de carbono y gases de efecto invernadero (van Vuuren et al., 2011), así como un continuo crecimiento poblacional y pocos o débiles esfuerzos relacionados con cambios o mejoras en las políticas de aprovechamiento energético (Riahi et al., 2011).

Para evaluar la distribución temporal y cobertura espacial de las diferentes fuentes de información oceanográfica revisadas, se generaron diagramas de barras y/o mapas de distribución superficial con la herramienta *Ocean Data View*® (Schlitzer,

2018, versión 5.1.7). En la Tabla 8 se resumen las diferentes fuentes de información revisadas para esta tesis.

**Tabla 8.** Fuentes de información oceanográfica consultadas para el POT.

<b>Fuente de información</b>	<b>Entidad responsable</b>	<b>Acceso</b>
Programa ERFEN	Dirección General Marítima de Colombia (DIMAR).	Centro Colombiano de Datos Oceanográficos: <a href="https://cecoldo.dimar.mil.co/web/">https://cecoldo.dimar.mil.co/web/</a>
WOD	Agencia Nacional Oceánica y Atmosférica-NOAA.	Centro Nacional de Información Ambiental – NODC: <a href="https://www.nodc.noaa.gov">https://www.nodc.noaa.gov</a>
WOA		
MODIS-Aqua	Administración de la Aeronáutica y el Espacio – NASA.	Centro de Vuelo Espacial Goddard: <a href="https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/">https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/</a>
Bio-ORACLE	Esfuerzo conjunto de varias entidades	<a href="http://www.bio-oracle.org">http://www.bio-oracle.org</a>

### 3. Resultados

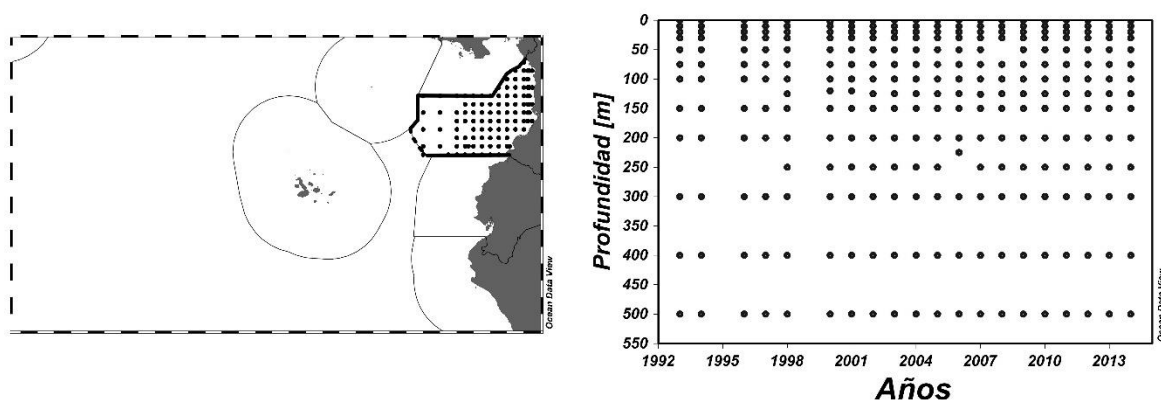
- Cruceros oceanográficos ERFEN: La información obtenida abarcó desde el año 1993 hasta el 2014, muestreándose aproximadamente 1048 estaciones entre los meses de agosto y diciembre de cada año, acorde con lo establecido en el Protocolo ERFEN. Los meses con mayor muestreo fueron septiembre (500 estaciones) y octubre (319 estaciones), acumulando entre ambos el 78.14 % de la información. Para los años 1995 y 1999 no hubo registro de cruceros de investigación y durante los años 2001 y 2002 se muestreó la mayor cantidad de estaciones :105 y 136 respectivamente (
- Tabla 9).

**Tabla 9.** Cantidad de estaciones ERFEN muestreadas por año.

Año	Mes					Total anual
	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
1993		7	42			49
1994				44		44
1995						
1996			52			52
1997				17	43	60
1998			61			61
1999						
2000				41	15	56
2001	56	49				105
2002		136				136
2003		44				44
2004		28	13			41
2005		40				40
2006		16				16
2007		42				42
2008		44				44
2009		26	18			44
2010		26	17			43
2011			31			44
2012		42		13		42
2013			44			44
2014			41			41
<b>Total mensual</b>	<b>56</b>	<b>500</b>	<b>319</b>	<b>115</b>	<b>58</b>	<b>1048</b>

La grilla de muestreo de los cruceros ERFEN-Colombia se compone por aproximadamente 40 estaciones permanentes espaciadas cada 0.5 grados. Estas estaciones se muestrearon desde la superficie hasta aproximadamente 500 metros a profundidades estándar (Figura 23).

**Grilla ERFEN-Colombia**



**Figura 23.** Distribución espacial de las estaciones ERFEN-Colombia (izq) y la profundidad alcanzada (der).

➤ Base Mundial de Datos Oceánicos - WOD:

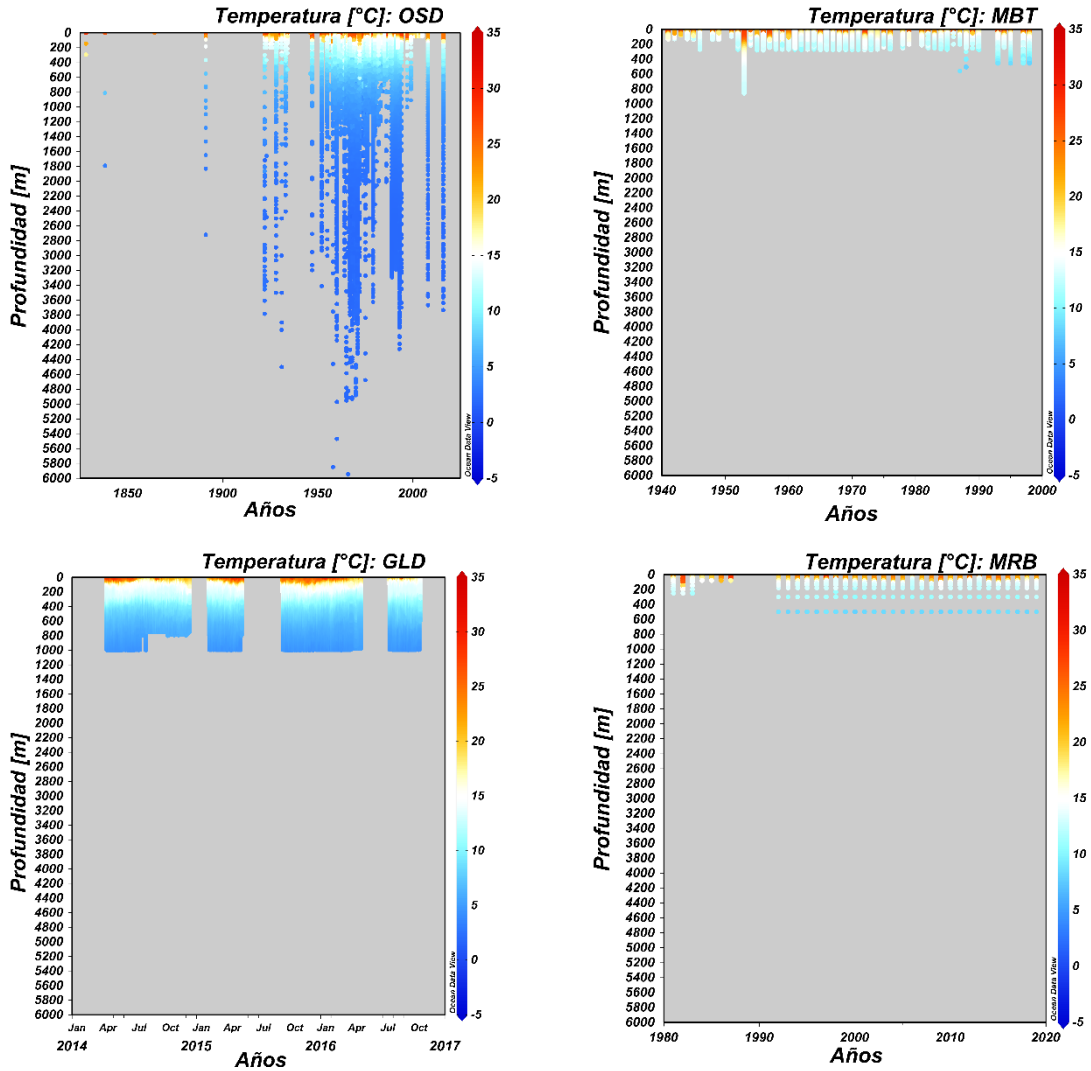
La información descargada incluyó 176.271 datos adquiridos por diferentes instrumentos de medición los cuales se resumen en la Tabla 10.

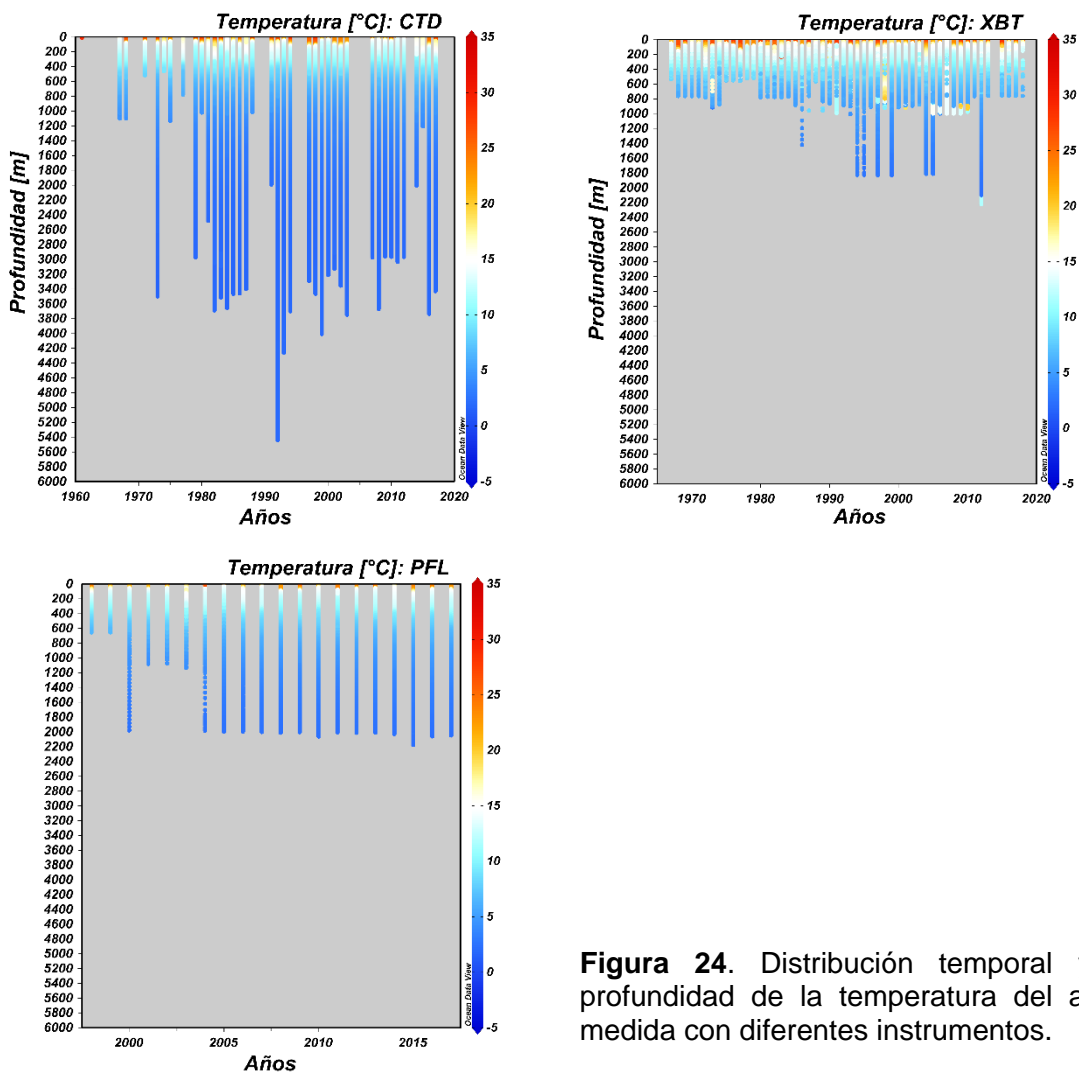
**Tabla 10.** Conjuntos de datos disponibles para el et-POT, según el WOD.

<b>Instrumento</b>	<b>Cantidad de datos</b>
OSD	22038
CTD	3168
XBT	28387
MBT	16671
PFL	35855
MRB	62693
SUR cruceros	827
GLD	7459
<b>Total</b>	<b>177098</b>

A pesar de la cantidad de datos disponibles, la distribución temporal fue diferente para cada uno de ellos, al igual que la profundidad alcanzada. Por ejemplo, para el MBT, la toma de información fue continua e inició en 1940 hasta aproximadamente el año 2000, alcanzando un máximo de mil metros de profundidad. Lo anterior contrasta con los datos de GLD que tienen una ventana de tiempo más corta y

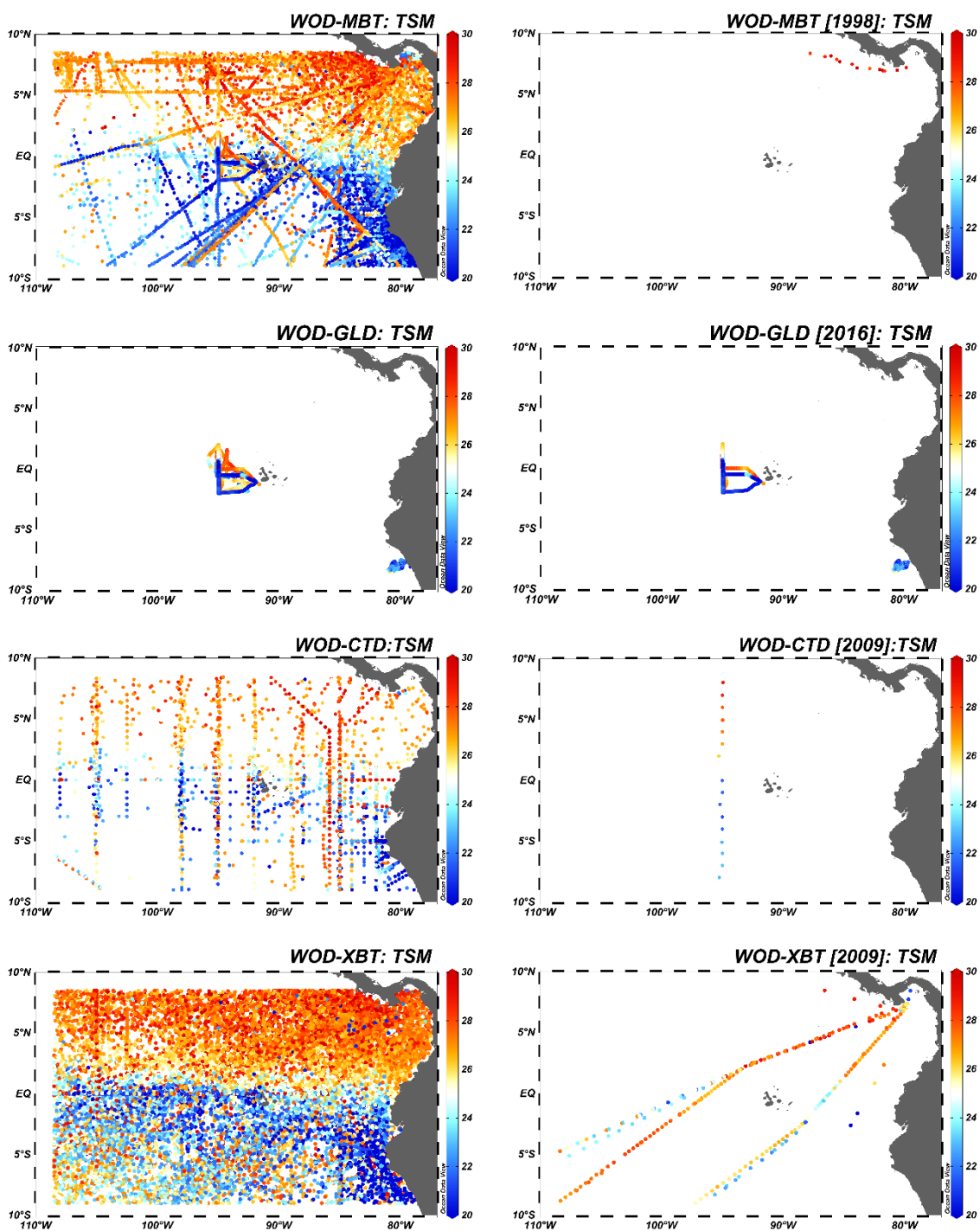
discontinua. Las mediciones realizadas con XBT fueron más constantes en el tiempo, desde la década de 1960 hasta la actualidad, alcanzando casi 2000 metros de profundidad. Si bien los registros de CTD también iniciaron en 1960 y alcanzaron casi el doble de la profundidad registrada por el XBT, las mediciones fueron intermitentes en el tiempo. En la Figura 24 se presenta la distribución temporal y en columna de agua de los datos medidos con diferentes instrumentos





**Figura 24.** Distribución temporal y a profundidad de la temperatura del agua medida con diferentes instrumentos.

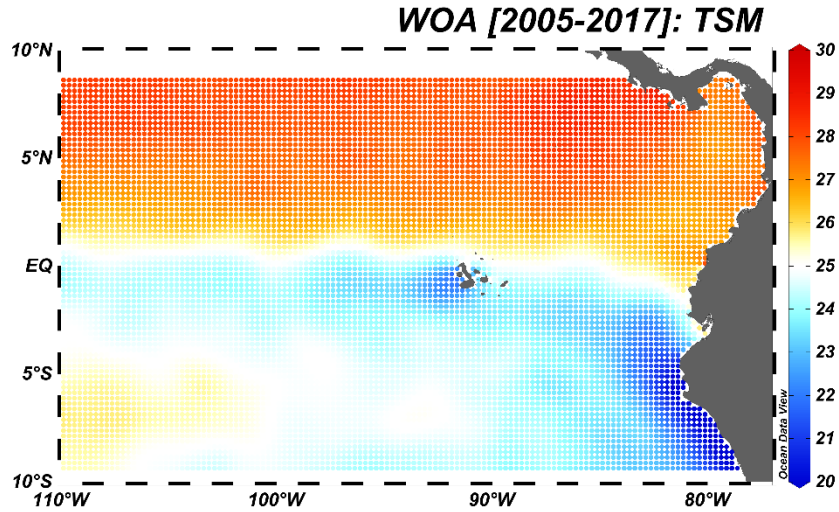
Graficar la cobertura espacial de los datos de la WOD, permitió observar que la cobertura puede ser completa con instrumentos como el XBT si se incluyen todos los datos oceanográficos desde 1960. Sin embargo, al seleccionar algún año o temporada específica, los vacíos de información fueron evidentes. Los mapas de distribución superficial de los datos oceanográficos medidos con MBT, GLD, CTD y XBT ilustran lo dicho anteriormente (Figura 25).



**Figura 25.** Cobertura espacial de las mediciones de temperatura hechas con diferentes instrumentos.

➤ Atlas Mundial de los Océanos – WOA:

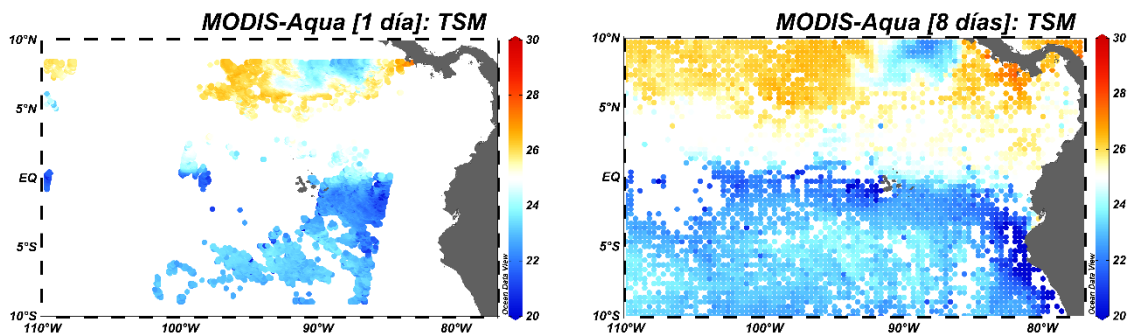
La colección seleccionada presentó una cobertura uniforme de la variable seleccionada (Figura 26).

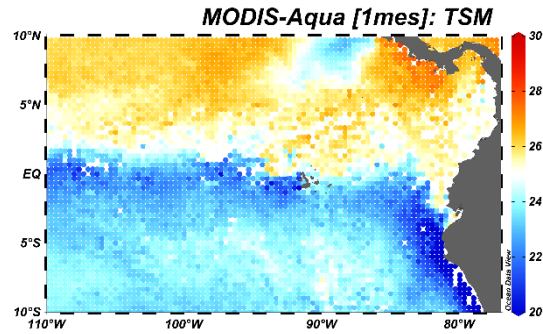


**Figura 26.** Cobertura espacial la temperatura superficial según climatología del WOA.

➤ Sensor MODIS-Aqua:

A pesar de tener una resolución espacial fina, la cobertura espaciotemporal fue diferente para los periodos de tiempo analizados. Los datos satelitales medidos durante un día se distribuyeron en forma de franja vertical de varios grados de extensión. Sin embargo, una semana después, dichas franjas son imperceptibles debido a una mayor cantidad de información satelital acumulada. Un mes después, los datos colectados cubren casi toda el área de estudio, aunque se distinguen algunos vacíos de información en el margen costero y sobre la zona ecuatorial (Figura 27).



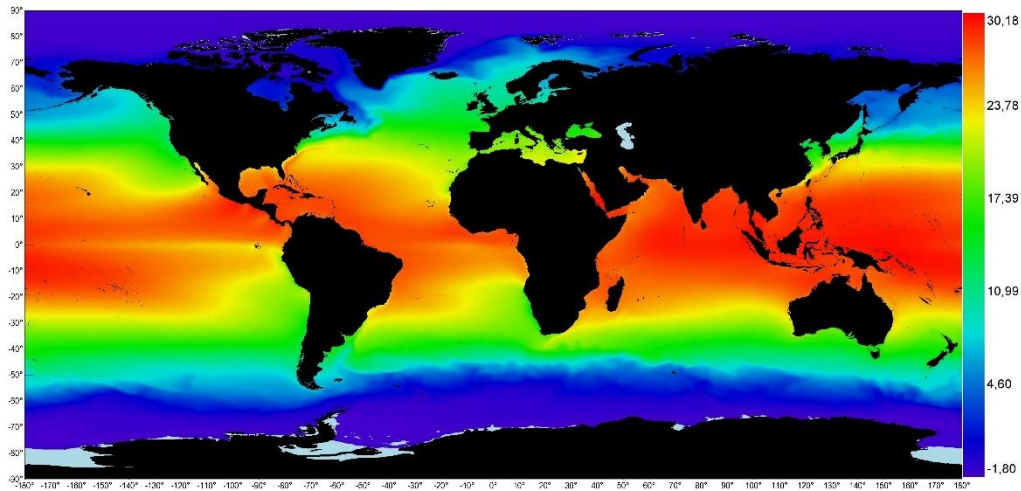


**Figura 27.** Cobertura espacial de TSM medida con el MODIS-Aqua.

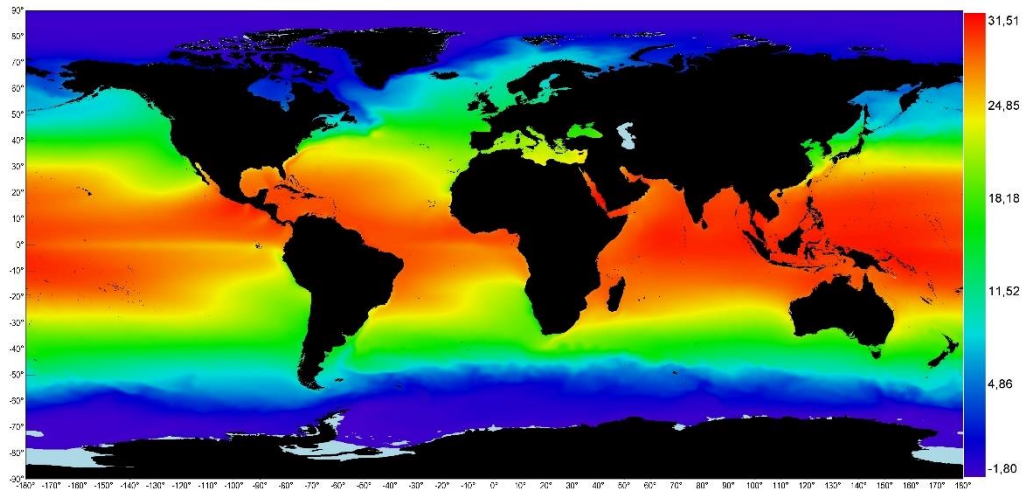
➤ Datos del portal Bio-ORACLE:

Los predictores ambientales a nivel superficial cumplieron con los requisitos de cobertura espacial (Figura 28) y disponibilidad de capas ambientales calculados para escenarios futuros de cambio climático (Tabla 11).

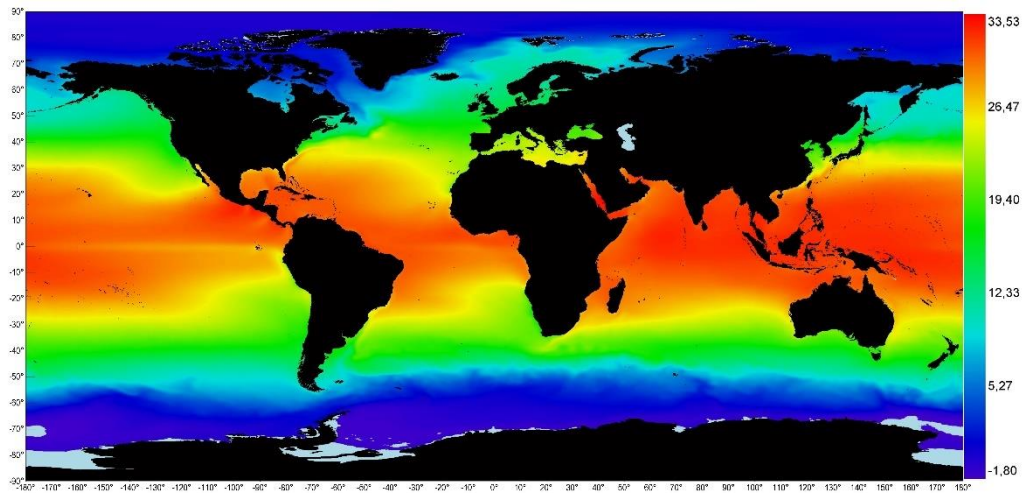
a)



b)



c)



**Figura 28.** Cobertura espacial de la temperatura superficial según Bio-ORACLE para condiciones a) Presente, b) Año 2050 y c) Año 2100. La escala de colores hace referencia a los niveles de la variable en grados Celsius.

**Tabla 11.** Características de las variables predictoras seleccionadas.

*Bio-ORACLE: Marine data layers for ecological modelling* ([www.bio-oracle.org](http://www.bio-oracle.org))

	Presente [2000-2014]	Futuro cercano [2040-2050]	Futuro lejano [2090-2100]
<b>VARIABLES</b>	✓ Temperatura	✓ Temperatura	
	✓ Salinidad	✓ Salinidad	
	✓ Velocidad de las corrientes	✓ Velocidad de las corrientes	
<b>Resolución espacial</b>	5 minutos de arco		
<b>Profundidad</b>	Superficial.		
<b>Formato</b>	<i>Tagged Image File Format</i> – TIFF		

## 4. Discusión

Aunque se discutió sobre los tipos de lances reportados por el POPC, el uso inevitable de DAPs en las pesquerías de atún y sus consecuencias ecológicas, estos dispositivos de agregación podrían ser una alternativa para resolver, a futuro, vacíos de información como los identificados en la revisión diagnóstica. Analizar los cambios en la posición y velocidad de desplazamiento de estos dispositivos podría robustecer la caracterización de los sistemas de corrientes oceánicas en regiones con poca información *in situ* o de difícil medición por la presencia de nubes como es el caso de la zona de estudio.

Un sistema de monitoreo de información oceanográfica basado en DAPs podría ser de bajo costo considerando que los materiales para su elaboración incluyen madera terciada, restos de redes de pesca, elementos para asegurar flotabilidad y las boyas georreferenciadoras, similar a lo reportado en otras regiones (Orue et al., 2019; Scott Fishery Consultants, 2014). Asimismo, la creciente preocupación por el estado de las pesquerías (Pitcher & Cheung, 2013) y las posibles consecuencias del cambio climático sobre el estado de estos recursos (Lehodey et al., 2013; Muhling et al., 2015), motivan el planteamiento de estudios multidisciplinarios (Herrera Montiel et al., 2019) que requieren información fiable, a diferentes escalas y lo más precisa posible (Becker et al., 2016).

Esta información, precisa y en tiempo real, podría ser proporcionada por los sensores o equipos multiparamétricos que podrían incorporarse a los DAPs. No obstante, es importante evaluar primero la idoneidad de las diferentes posibilidades instrumentales disponibles, pues como se indicó en la revisión diagnóstica, los sensores y equipos oceanográficos actuales alcanzan diferentes profundidades, condicionando así el cumplimiento de los objetivos de la investigación que incluya DAPs como plataformas de investigación. Adicionalmente es necesario establecer canales de comunicación y acuerdos de cooperación con el sector atunero para que la información oceanográfica adquirida con los DAPs pueda ser analizada e incluida dentro de las diferentes bases de datos oceanográficos existentes, tal y como sugiere Weller y colaboradores (2019). Este último aspecto sería una contribución importante para productos como la WOD a escala regional, pues podrían cubrirse los vacíos de información en regiones como el POT. Además, productos que dependan de la WOD como el WOA, también se verían favorecidos, ya que el cálculo de las climatológicas y promedios decadales serían más aún más precisos. Medir las variables oceanográficas en simultáneo con el desarrollo de las faenas atuneras contribuiría además con la identificación de condiciones favorables para la presencia y permanencia de especies de interés (Zainuddin et al., 2017). También sería posible identificar zonas y temporadas de reproducción de especies de interés comercial con el objetivo de fortalecer medidas de conservación de dichos recursos (Teo, Boustany, & Block, 2007), aparte de contribuir con la caracterización ambiental de zonas de alta concentración de DAPs como la identificada con los registros del POPC. Otro beneficio potencial de los DAPs como plataformas de investigación, sería la posibilidad de tener series de tiempo más completas y continuas que permitan validar y/o complementar la información adquirida durante cruceros oceanográficos como el ERFEN o sensores remotos como el MODIS. La importancia de incluir datos oceanográficos *in situ* de calidad como insumo para la calibración de modelos oceanográficos a diferentes escalas es un requisito vigente (Caldeira et al., 2016), a pesar de las constantes mejoras en el instrumentos de medición.

## **5. Conclusiones y recomendaciones**

Las diferencias en la distribución espaciotemporal y los vacíos de información identificados en la revisión diagnóstica fueron argumentos suficientes para descartar al programa ERFEN, los datos del WOD, del WOA y las mediciones satelitales como fuentes de variables ambientales para desarrollar los objetivos de esta tesis pues no cumplen las condiciones de ser lo suficientemente precisas y estar en la ubicación correcta.

Se seleccionó entonces la información disponible en el portal de Bio-ORACLE por cumplir con los criterios necesarios para modelar la distribución potencial de las especies de interés, lo cual se recomienda para cualquier ejercicio de análisis de distribución potencial en entornos marinos.

---

## Capítulo 3: Modelos de distribución de especie, idoneidad de hábitat y cambios en el rango de distribución

### 1. Introducción

Los atunes a nivel mundial son la base de una de las pesquerías más importantes, lo anterior debido a su rápido crecimiento y desarrollo sexual, a su distribución mundial y alta capacidad de migración. Además, prefieren zonas cuyas temperaturas oscilen entre 15°C y 30°C, se asocian con cambios en la termoclina y frentes térmicos (B. B. Collette & Nauen, 1983; Matsumoto et al., 1984; M. B. Schaefer, Broadhead, & Orange, 1963). En el Pacífico Oriental Tropical la captura de atún a gran escala la realiza la flota cerquera de diferentes nacionalidades, siendo el atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) y el atún barrilete (*Katsuwonus pelamis*) dos de las especies objetivo más importantes. Según la IATTC, entre 1983 y 2012, las capturas reportadas únicamente por embarcaciones cerqueras CIAT-clase 6 oscilaron entre 83 mil y 412 mil toneladas métricas para el aleta amarilla y entre 50 mil y 296 mil t para el barrilete (IATTC, 2013). Para la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza – IUCN, al año 2011 la tendencia poblacional de *T. albacares* era decreciente y se encontraba casi amenazado (B. Collette, Acero, Amorim, Boustany, Canales Ramirez, C., Cardenas, et al., 2011), mientras para *K. pelamis*, al año 2014, su tendencia poblacional era estable (B. Collette & Heessen, 2015). Dada la importancia comercial de estas especies y con el objetivo de asegurar la disponibilidad del recurso, en el POT se han adoptado diferentes medidas de conservación y ordenamiento como las vedas espacio temporales y el monitoreo de las faenas atuneras por parte de observadores a bordo (IATTC, 2017a).

Similar a los atunes, el *C. hippurus* también es una especie de interés comercial con una alta capacidad migratoria gracias a la cual se ubica en ambientes tropicales y subtropicales (Farrell, Boustany, Halpin, & Hammond, 2014; Massutí, Enric & Morales-Nim, 1997; Palko et al., 1982), prefiriendo zonas cuya temperatura oscile entre 21°C y 30°C (Zúñiga Flores, Ortega-García, & Klett-Traulsen, 2008) y se presenten marcados cambios en la termoclina (Furukawa et al., 2014). Aparte de lo anterior, el dorado también es una especie depredadora (Lasso & Zapata, 1999; H. A. Oxenford, 1999) que se asocia con otros pelágicos migratorios como el atún (Martínez-Ortiz, Aires-Da-silva, Lennert-Cody, & Maunder, 2015), razón por la cual hace parte de la captura incidental de dichas pesquerías en todo el mundo (IATTC, 2005). Aunque la tendencia poblacional del dorado es estable (B. Collette, Acero, Amorim, Boustany, Canales-Ramirez, C. Cardenas, et al., 2011) y para el año 2011 se consideraba como una pesquería emergente (Whoriskey, Arauz, & Baum, 2011), en la actualidad, el mercado de *C. hippurus* ocupa renglones importantes en la economía de países como Perú, el cual entre 2011 y 2016 reportó ganancias de hasta 79 millones de dólares, ubicándolo así como el principal productor de esta especie con más del 50% de la producción mundial (Amoros et al., 2017; Cannizzaro, D'Andrea, Potoschi, & Scalisi, 1999). Para el caso de Perú, las toneladas capturadas y la cadena comercial derivada de la pesquería de *C. hippurus* motivaron la formulación del Plan de Acción Nacional para el manejo y conservación de este recurso (Quinteros-Malpartida & Ñiquen-Carranza, 2016). Además de la medida anterior, con el propósito de reforzar las medidas de conservación y óptimo aprovechamiento de este recurso pesquero, se han recomendado vedas espaciotemporales que permitan disminuir las capturas de esta especie en estadios juveniles, delimitación de áreas protegidas enfocadas a la preservación de la especie (Dapp, Arauz, Spotila, & O'Connor, 2013) y liberación de los individuos de dorado capturados incidentalmente durante faenas atuneras cerqueras (IATTC, 2019). Si bien las medidas de conservación para los atunes y el dorado pueden parecer acertadas ahora, posibles cambios en el rango de su distribución potencial frente a los diferentes escenarios de cambio climático propuestos por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático – IPCC, deberían

ser aspectos adicionales a considerar para realizar los ajustes respectivos a dichas medidas de ordenación y conservación. El objetivo de dichas consideraciones sería garantizar que las poblaciones conserven y/o mejoren su tendencia actual para que sean aprovechables a futuro. En promedio entre 1950 y 2009, la temperatura se ha incrementado en 0.31°C para el Océano Pacífico (IPCC, 2014a), fenómeno que se ha visto reflejado en cambios en los rangos de distribución de peces y disminución en la disponibilidad del recurso pesquero, con consecuencias directas en los costos de las faenas y comercialización de los productos (Cheung, Pinnegar, Merino, Jones, & Barange, 2012). Considerando lo anterior y la importancia comercial que tienen las especies de interés consideradas en esta tesis, es conveniente analizar si sus rangos de distribución y zonas de idoneidad ambiental actual podrían cambiar con respecto al escenario de cambio climático más extremo. Para responder a lo anterior, se emplearon diferentes algoritmos para modelar la distribución potencial e idoneidad de hábitat actual del *T. albacares*, *K. pelamis* y *C. hippurus*, proyectándolos a futuro considerando el escenario de cambio climático más extremo planteado por el IPCC: el RCP 8.5 (Speers, Besedin, Palardy, & Moore, 2016), esto con el propósito final de evaluar cambios en el rango de la distribución potencial para estas especies y una posible reubicación de las zonas con condiciones favorables para su presencia.

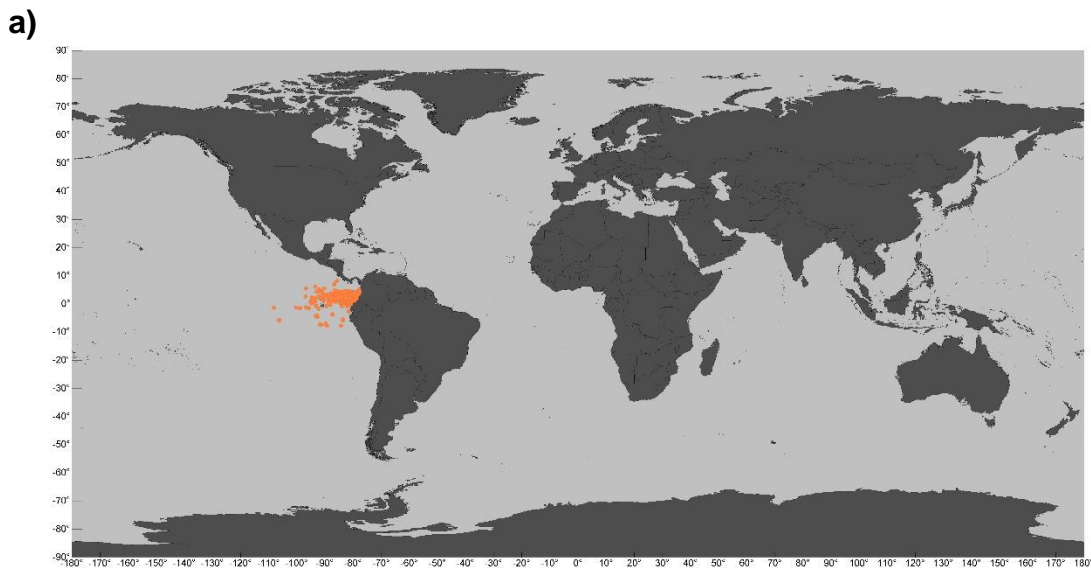
## 2. Materiales y métodos

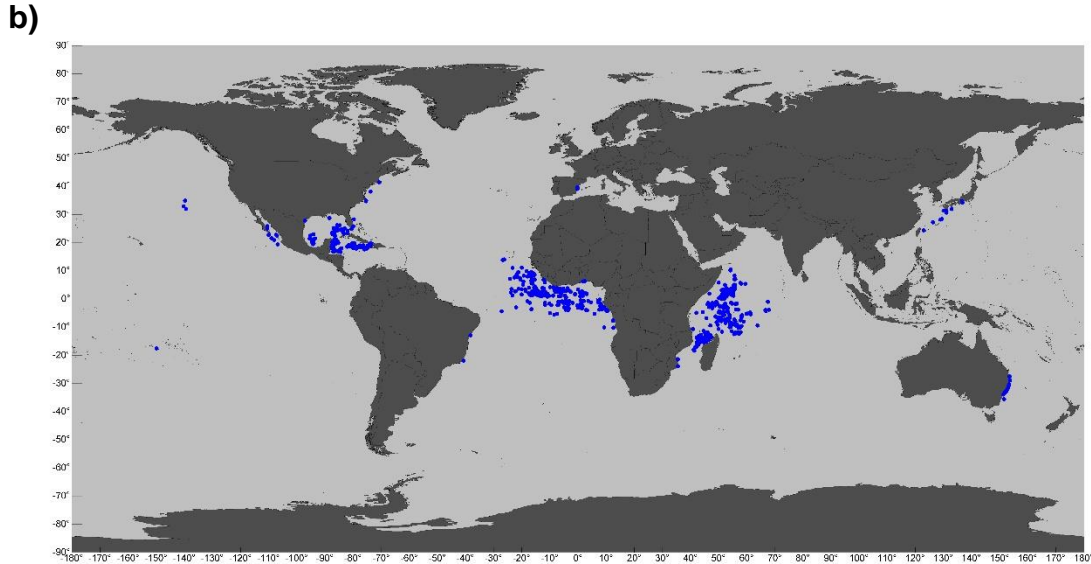
### 2.1. *Preparación de información previo a la generación de modelos de distribución*

#### ➤ Complementando los registros de presencia del POPC:

Dada la alta capacidad migratoria de las especies objeto de este estudio y su rango de distribución mundial (Milner B. Schaefer, Broadhead, & Orange, 1963; Wexler, Margulies, & Scholey, 2011), la estimación del nicho ambiental de los atunes y el dorado a través de modelos, requiere que los datos utilizados para ello incluyan todos los entornos posibles que representen hábitats adecuados para la especie modelada, al menos dentro de su área de distribución colonizable (Soberón, 2007).

Por esta razón, los registros de presencia procesados en el Capítulo 1 fueron complementados con información de presencia disponible en el *Global Biodiversity Information Facility - GBIF* (Consultado en: <https://www.gbif.org>). Para acceder a la información del GBIF, se empleó el módulo *Database Manager* de la herramienta computacional ModestR® (García-Roselló et al., 2013), descargando los registros de presencia de las especies de interés mencionadas anteriormente. Además, dicho módulo permite aplicar un control de calidad preliminar a la información mediante la identificación de registros no válidos o fuera del entorno de distribución de la especie. El procedimiento aplicado se explica en el Tutorial No. 2 del ModestR (Consultado en: [http://www.ipez.es/modestr/Manual\\_Tutorial.html](http://www.ipez.es/modestr/Manual_Tutorial.html)). Dado que estos registros pueden descargarse en formato *Comma Separated Value* (csv), fueron consignados en hojas de cálculo e incorporados a los registros tabulados del POPC. Estos registros actualizados y compuestos por datos POPC y GBIF fueron exportados igualmente en formato .csv. . La forma en que los registros del POPC y el GBIF se complementan espacialmente, se ilustra en la Figura 29.





**Figura 29.** Distribución de coordenadas de presencia de *C. hippurus* reportados a) El POPC y b) Descargados del GBIF.

➤ Heterogeneidad ambiental y filtro de ocurrencias:

Dentro de los supuestos metodológicos relacionados con modelos de distribución de especie e idoneidad de hábitat, es de especial importancia aquel que se relaciona con la independencia de los registros de presencia que servirán de base a dichos modelos (Guisan et al., 2017). Dado que los registros de presencia de las especies empleadas como insumo para los modelos de distribución provienen de faenas atuneras y no de cruceros de prospección pesquera u otro tipo de experimento diseñado previamente, es posible que exista un sesgo espacial y temporal en la información obtenida derivando en una posible sobreestimación de los modelos (Veloz, 2009). Para corregir esto, se contempló el criterio de heterogeneidad ambiental para filtrar la información (Vetter et al., 2018). El filtro según la heterogeneidad ambiental se aplicó acorde a Brown y colaboradores (2017) considerando los predictores ambientales de Bio-ORACLE mencionados en el capítulo anterior, empleando la aplicación ArcMap del paquete de programas de procesamiento de información espacial ArcGIS (versión 10.3), específicamente la caja de herramientas *SDM Toolbox 2.0*. Según la guía del *SDM Toolbox*, la cantidad de clases de heterogeneidad ambiental está definida por defecto en tres clases, siendo el tipo de clasificación los “quebres naturales” o *natural jenks*. Sin

embargo y para una correcta selección de cantidad de clases de heterogeneidad ambiental, se generó el histograma de clasificación con el fin de identificar la cantidad adecuada de dichas clases (North, 2009). Al final, se seleccionó la cantidad máxima de categorías de clasificación disponibles en la *SDM Toolbox* (cinco), para todas las variables predictoras. Una vez definida el tipo y cantidad de clases, se siguió la guía *SDM Toolbox 2.0* de la siguiente forma:

1. Análisis de componentes principales para estimar heterogeneidad ambiental a partir de las variables predictoras.
2. Medición de la heterogeneidad ambiental estimada en el punto anterior.
3. Filtro de registros de presencia considerando la heterogeneidad ambiental.
4. Exportar datos de presencia filtrados, en formato .csv.

Es importante tener presente que estos últimos subconjuntos compuestos por registros de presencia filtrados según la heterogeneidad ambiental serán el insumo definitivo para la generación de los modelos de distribución.

## 2.2. Selección de los modelos de distribución de especies

Los algoritmos empleados para estimar los modelos de distribución de especie se pueden agrupar en cuatro categorías diferentes (Guisan et al., 2017):

- Modelos geográficos: No emplean información ambiental, sólo utilizan las presencias de la especie de interés para predecir la probabilidad de ocurrencia en otros lugares.
- Modelos de perfil: También conocidos como modelos de envoltura ambiental, utilizan datos de presencia y se basan en la caracterización de las condiciones ambientales de los lugares asociados con la presencia de especies. Solo permite variables ambientales continuas.
- Modelos estadísticos de regresión: Requieren información de presencia y ausencia, siendo estas ausencias verdaderas o pseudoausencias. Estiman el efecto de diferentes variables ambientales sobre la distribución de una

especie a partir de todos los datos disponibles y la construcción de una función que describa mejor el efecto de estos predictores sobre la ocurrencia de especies. La idoneidad de un modelo en particular suele estar definida por supuestos específicos del modelo. Incluye las interacciones entre las variables ambientales, las cuales pueden ser continuas o categóricas.

- Modelos de aprendizaje automático: Requieren información de presencia y ausencia y utilizan una parte de los datos para entrenar el modelo y describir el conjunto de datos (formación) y la otra parte para evaluar la precisión del mismo. Se basan en árboles de decisión (excepto los análisis por Redes Neuronales Artificiales).

A excepción del algoritmo BIOCLIM, para los demás modelos se utilizó la colección de funciones BIOMOD 2, acrónimo de *BIOdiversity MODelling*, el cual es un paquete del lenguaje de programación R que actúa como una plataforma para la generación y análisis de diferentes modelos de distribución, pudiendo evaluarse en simultáneo distintos algoritmos (Thuiller, Georges, Engler, & Breiner, 2016; Thuiller, Lafourcade, & Araujo, 2012). BIOCLIM, considerado el primer modelo de especies con enfoque de cobertura climática (Booth, Nix, Busby, & Hutchinson, 2014), actualmente hace parte del paquete de funciones *Species Distribution Modeling – DISMO*, de R (Hijmans, Phillips, Leathwick, Elith, & Hijmans, 2017) y se caracteriza por no necesitar de información de ausencias para su correcto funcionamiento.

Los algoritmos empleados para el análisis de la distribución potencial de las especies y posibles cambios frente al escenario más drástico de cambio climático se resumen en la Tabla 12.

**Tabla 12.** Algoritmos empleados y disponibles en BIOMOD2.

<b>BIOMOD 2</b>		
<b>Modelos de perfil</b>	<b>Modelos estadísticos de regresión</b>	<b>Modelos de aprendizaje automático</b>
1) Bioclim (Booth et al., 2014)	2) Análisis Flexible Discriminante -FDA (Hastie, Tibshirani, & Buja, 1994)	6) Análisis de Árboles de Clasificación-CTA (Breiman, Friedman, Olshen, & Stone, 1984).

	<p>3) Modelos Lineales Generalizados-GLM (Venables &amp; Dichmont, 2004).</p> <p>4) Modelos Aditivos Generalizados-GAM (Venables &amp; Dichmont, 2004).</p> <p>5) Splines de Regresión Adaptativa Multivariada-MARS (Friedman, 1991).</p>	<p>7) Árboles de Regresión Potenciados-BRT (Elith, Leathwick, &amp; Hastie, 2008).</p> <p>8) Modelo Potenciado Generalizado-GBM (Ridgeway, 2007).</p> <p>9) Redes Neuronales Artificiales-ANN (Ripley, 1994).</p> <p>10) Máxima Entropía-MaxEnt (Phillips, P. Anderson, &amp; Schapire, 2006).</p>
--	---	--

Para cada especie, las salidas de los modelos incluyeron:

1. Estadísticos de evaluación de los modelos.
2. Prueba de *Jackknife* para evaluar la contribución de las variables ambientales al modelo.
3. Curvas de respuesta de las variables ambientales.
4. Mapas de distribución potencial e idoneidad de hábitat para la especie en condiciones actuales.
5. Mapas de idoneidad de hábitat para la especie bajo condiciones futuras de cambio climático.
6. Mapas de cambio en el rango distribución potencial de las especies bajo condiciones futuras de cambio climático.

Con respecto a la idoneidad de hábitat, es importante mencionar que abarca valores de 0 a 1, siendo 1 indicador de condiciones más apropiadas o convenientes para la presencia de la especie.

Para correr los modelos se empleó el Laboratorio Virtual de Cambio Climático y Biodiversidad – BCCVL (Hallgren et al., 2016), el cual ofrece importantes ventajas para los investigadores:

- ✓ Acuerdo de uso de datos especificado y modificable según necesidades del usuario y el tipo de información trabajada.
- ✓ Acceso gratuito y soporte técnico por parte del equipo del BCCVL.
- ✓ Acceso a diferentes fuentes de información biológica y ambiental.

- ✓ Los modelos de distribución de especie se corren virtualmente, disminuyendo el gasto computacional.
- ✓ Comparación de diferentes algoritmos de manera simultánea.
- ✓ Generación de resultados y gráficas descargables, en formatos interoperables con otras herramientas.
- ✓ Posibilidad de incorporar escenarios de cambio climático para proyección de los modelos de distribución.
- ✓ Posibilidad de acceder y descargar la rutina en lenguaje de programación R®, para cada experimento.

### *2.3. Generación de pseudoausencias y configuración de algoritmos*

### *2.4. Interpretación de resultados, evaluación, ensamble y validación de modelos*

## **3. Resultados**

### *3.1. Heterogeneidad ambiental y análisis de componentes principales*

En análisis de componentes principales aplicado a la capa ambiental compuesta por las variables predictoras seleccionadas indica que el mayor porcentaje de la varianza explicada corresponde al 96.72% y se asocia con el primer componente principal. A dicho componente contribuye en mayor medida la temperatura superficial del agua, seguido de la salinidad y la velocidad de las corrientes, con autovectores de 0.995, 0.095 y 0.002 respectivamente. A pesar de que la temperatura estaría aportando mayor porcentaje de información a la capa ambiental, el análisis de correlación aplicado a la información durante el análisis de heterogeneidad ambiental señala que la correlación es baja entre los predictores

(< 0.45), por lo cual los tres son incluidos para realizar el proceso de filtrado de ocurrencias de las especies (Tabla 17).

**Tabla 17.** Análisis de componentes principales aplicado a la capa ambiental marina.

Componente	Autovalores	Varianza explicada	Varianza acumulada
1	88.18	96.72 %	96.72 %
2	2.98	3.27 %	99.99 %
3	0.005	0.005%	100 %

Predictor	Autovectores		
	Componente 1	Componente 2	Componente 3
TSM	0.995	-0.096	-0.002
Salinidad	0.095	0.995	-0.001
Velocidad de las corrientes	0.002	0.001	1.000

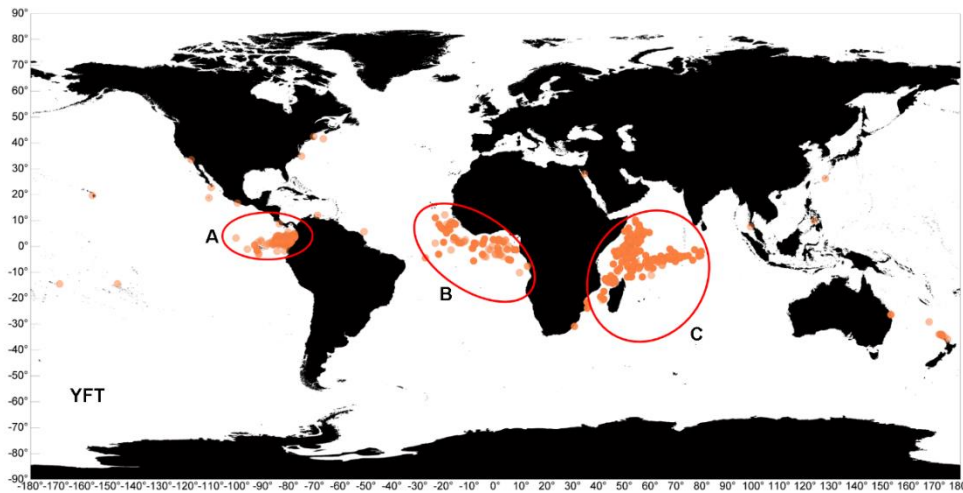
Matriz de correlación entre los predictores ambientales			
	TSM	Salinidad	Velocidad de las corrientes
TSM	1	0.448	0.299
Salinidad	0.448	1	0.163
Velocidad de las corrientes	0.229	0.163	1

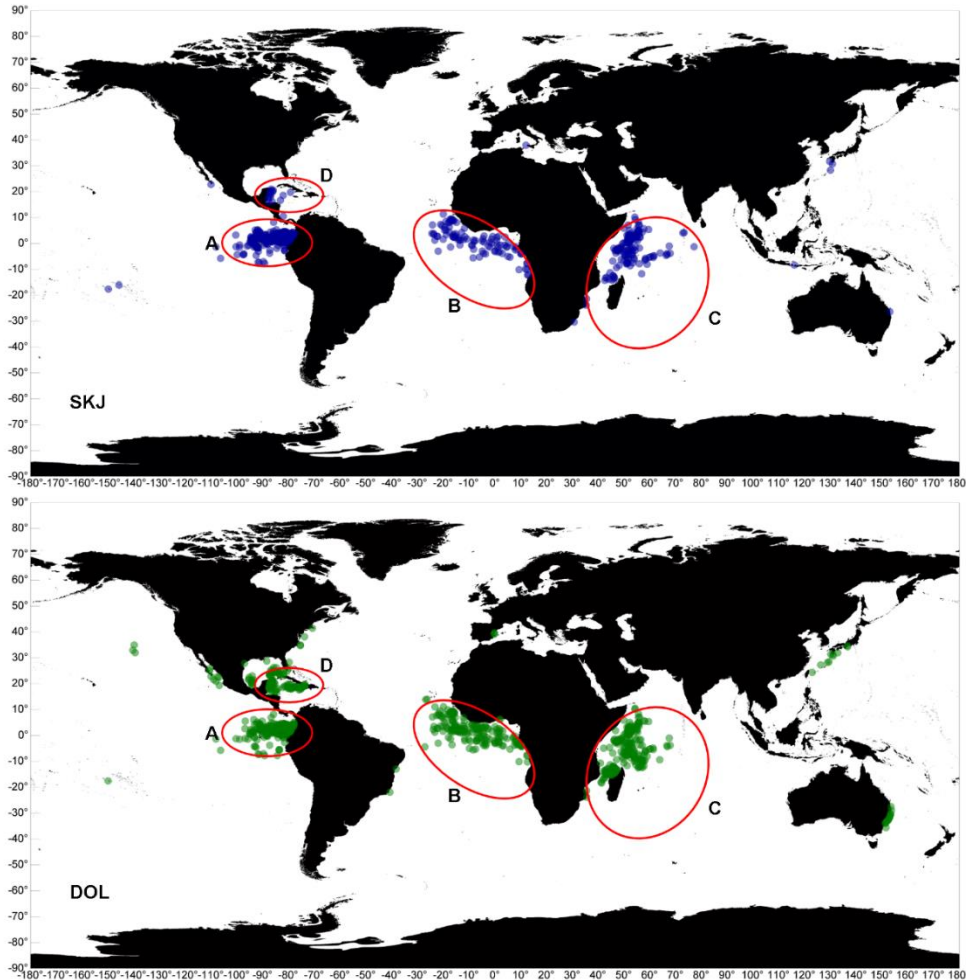
El filtro aplicado a cada uno de los conjuntos de datos de presencia compuestos por registros del POPC y GBIF, redujo la información aproximadamente en un 70% para cada una de las especies. El tamaño muestral final a partir del cual se generaron los modelos de distribución de especies en condiciones iniciales para su posterior proyección en escenarios de cambio climático, fueron: 648 para *T. albacares*, 649 para *K. pelamis* y 915 para *C. hippurus*, para un total de 2212 registros de ocurrencia (Tabla 18).

**Tabla 18.** Cantidad inicial y final de ocurrencias después del filtro de heterogeneidad ambiental.

Especie	Cantidad inicial de registros	Cantidad final de registros	Porcentaje de información filtrada
<i>T. albacares</i>	2778	648	76.67 %
<i>K. pelamis</i>	2821	649	76.99 %
<i>C. hippurus</i>	4293	915	78.68 %
Total	9892	2212	

A pesar de la reducción, la distribución los registros filtrados para YFT, SKJ y DOL cumplió con el requisito de ubicarse en todos los ambientes posibles para una correcta modelización de su distribución potencial. Las presencias filtradas para las especies se ubicaron casi en las mismas regiones: En el Mar Caribe, específicamente en el Golfo de México y dentro de un área delimitada por la Península de Yucatán, Honduras y Cuba. El Océano Atlántico Central Oriental, específicamente en el Golfo de Guinea, desde Senegal hasta Angola, extendiéndose desde el margen costero africano hasta aproximadamente 30 grados de longitud oeste. En el Océano Índico, los registros se ubicaron en desde las costas de Somalia hasta Mozambique, extendiéndose hasta la Isla de Madagascar, llegando a 70 grados longitud. En el Océano Pacífico Oriental Tropical, frente a las costas de Colombia, Ecuador y norte de Perú, alcanzando aguas internacionales hasta casi los 110 grados de longitud oeste (Figura 33).





**Figura 33.** Distribución de ocurrencias filtradas para: YFT (puntos naranja), SKJ (azules) y DOL (verdes). Las ocurrencias se ubicaron en A) Océano Pacífico Oriental Tropical, B) Golfo de Guinea en el océano Atlántico, C) Costas de Somalia, Mozambique y Madagascar en el océano Índico y D) Península de Yucatán y Golfo de México en el Mar Caribe.

### 3.2. Modelos de distribución de especie, AUC y curvas de respuesta

Los modelos de distribución potencial en condiciones actuales estimados para las tres especies tuvieron una precisiones predictivas (AUC) de buenas a excelentes: desde 0.89 hasta 1.00, según la escala propuesta por Araújo y colaboradores (2005). Los niveles de predicción más elevados ( $> 0.95$ ) correspondieron principalmente a modelos de aprendizaje automático y árboles de clasificación (CTA, ANN y GBM), mientras los valores más bajos (entre 0.89 y 0.94) fueron de la familia de estadísticos de regresión y modelos de perfil (GLM, GAM, MaxEnt, Bioclim) (Figura 34).

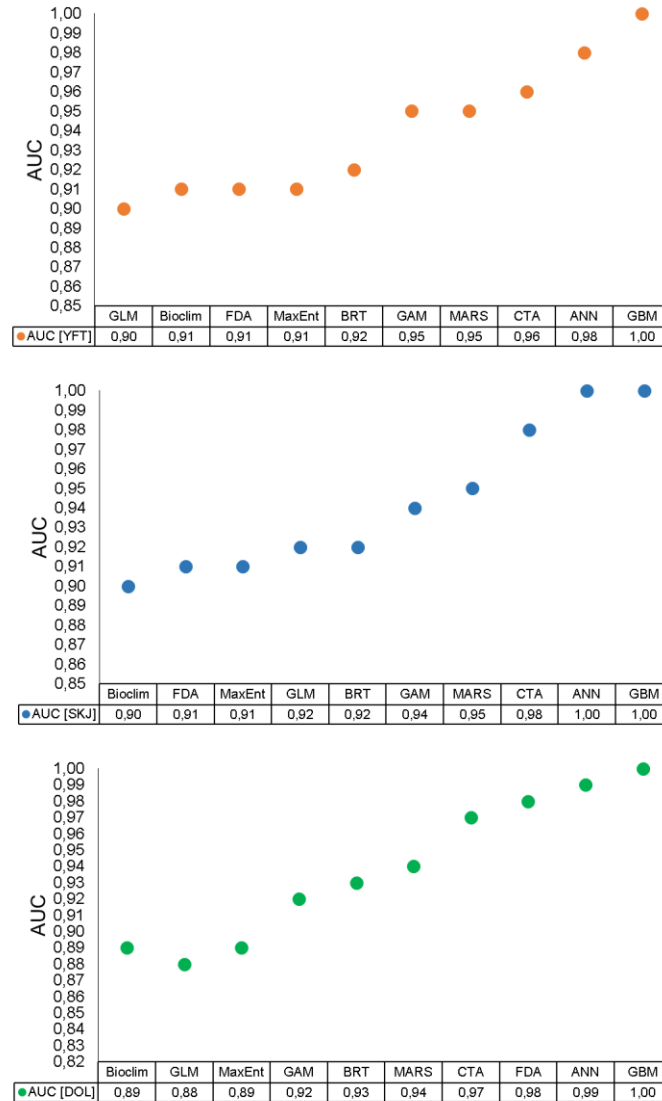
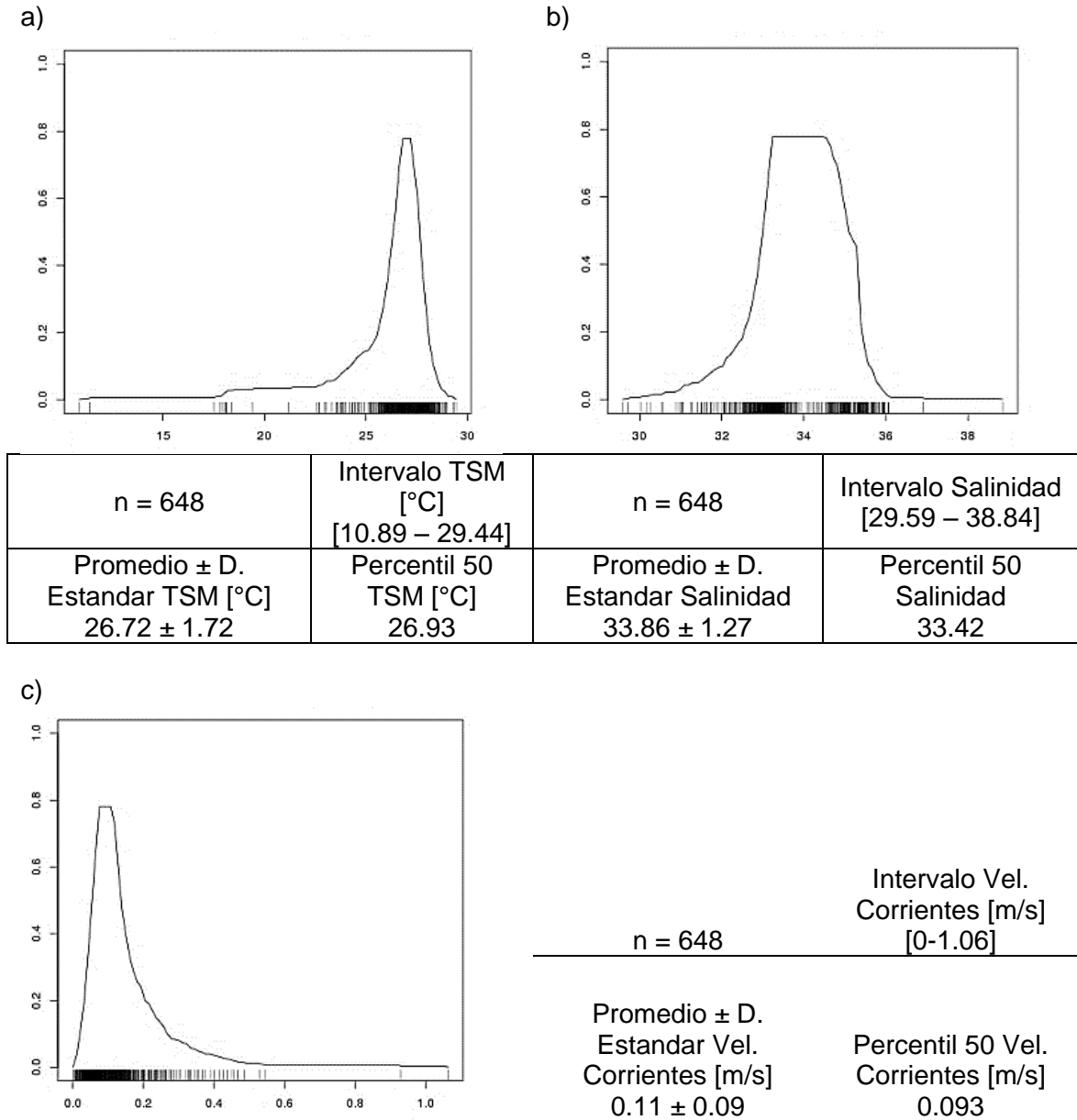


Figura 34. AUC para los diferentes modelos de distribución generados para *T. albacares* (superior), *K. pelamis* (centro) y *C. hippurus* (inferior).

A pesar de que todos los modelos para las tres especies tuvieron desempeños entre buenos y excelentes, al revisar las curvas de respuesta de los predictores ambientales con respecto a la probabilidad de ocurrencia de las especies, se observó que únicamente los modelos de Bioclim proporcionaron información concluyente en este aspecto, es decir: curvas de respuesta para los tres predictores y las tres especies. A partir de las curvas de respuesta es posible definir los índices de idoneidad de hábitat (0 indicando menor idoneidad y 1 máxima idoneidad) para cada caso, a partir de la temperatura superficial del mar, la salinidad superficial y la velocidad de las corrientes. Es importante mencionar que debido al

funcionamiento del Bioclim (Thuiller, Lafourcade, & Araujo, 2012), se consideró el percentil 50 (mediana) como valor de referencia en torno al cual se estaría alcanzando la mayor probabilidad de ocurrencia de las especies, esto complementario a la información obtenida con las curvas de respuesta para este algoritmo. A partir del buen desempeño de los modelos Bioclim para cada especie representado por altos valores de AUC, 0.91 para YFT, 0.90 para SKJ y 0.89 para DOL (Figura 34), se presentan los resultados conducentes al cumplimiento de los objetivos específicos propuestos en esta tesis .

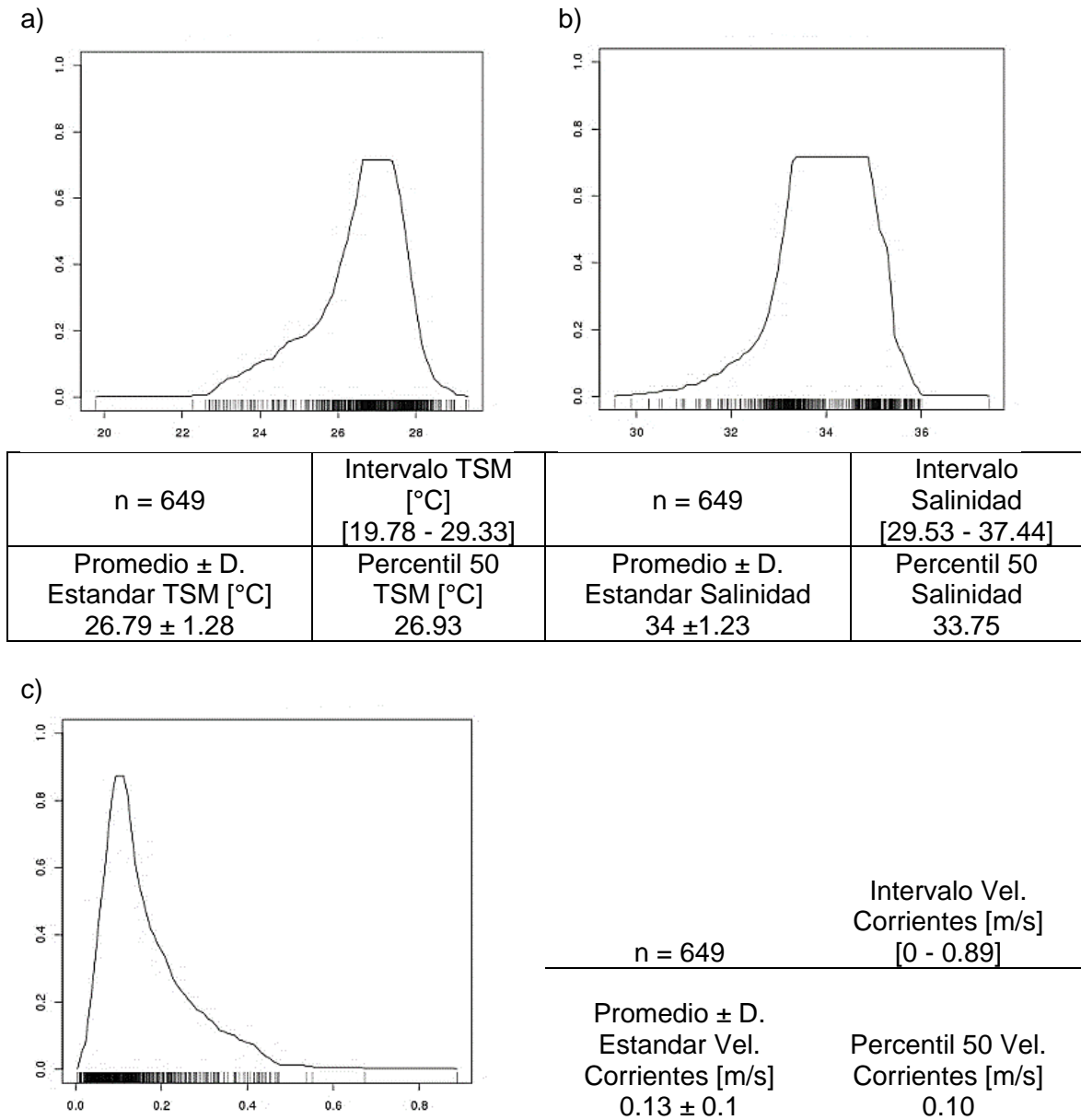
Según las curvas de respuesta generadas por Bioclim, que sugieren probabilidades de ocurrencia entre 0 y 1, siendo 1 la mayor probabilidad, la presencia de *T. albacares* se asoció con valores de TSM entre 10.89°C y 29.44°C, con salinidades entre 29.59 y casi 39 y velocidad de las corrientes desde 0 hasta 1 m/s. Sin embargo, con respecto a la temperatura superficial, la máxima probabilidad de ocurrencia (aproximadamente de 0.80), se relacionó con valores de temperatura cercanos a los 27°C, lo cual concuerda con el percentil 50 estimado para esta variable (26.93°C). Para la salinidad, la probabilidad máxima de ocurrencia del YFT se ubicó entre 33 y 35 (probabilidad cercana a 0.80), aunque el percentil 50 sugiere 33.42 como la salinidad más probable para encontrar la especie. La mayor probabilidad de ocurrencia de la especie con respecto a la velocidad de las corrientes se relaciona con 0.1 m/s, lo cual también coincide con el percentil 50 estimado (Figura 35).



**Figura 35.** Curvas de respuesta y estadística descriptiva de a) TSM, b) Salinidad y c) Velocidad de las corrientes para *T. albacares*, generadas con el modelo Bioclim.

Para *K. pelamis*, el intervalo de temperatura superficial relacionado con su probabilidad de ocurrencia incluyó valores desde 19.78°C hasta 29.33°C, salinidad de 29.53 a 37.44 y velocidad de las corrientes de 0 a 0.89 m/s. La mayor probabilidad de presencia para esta especie se relacionó con valores de temperatura superficial salinidad y velocidad de las corrientes similares a lo obtenido para *T. albacares*: 27°C, 33.5 y 0.1 respectivamente. Los valores

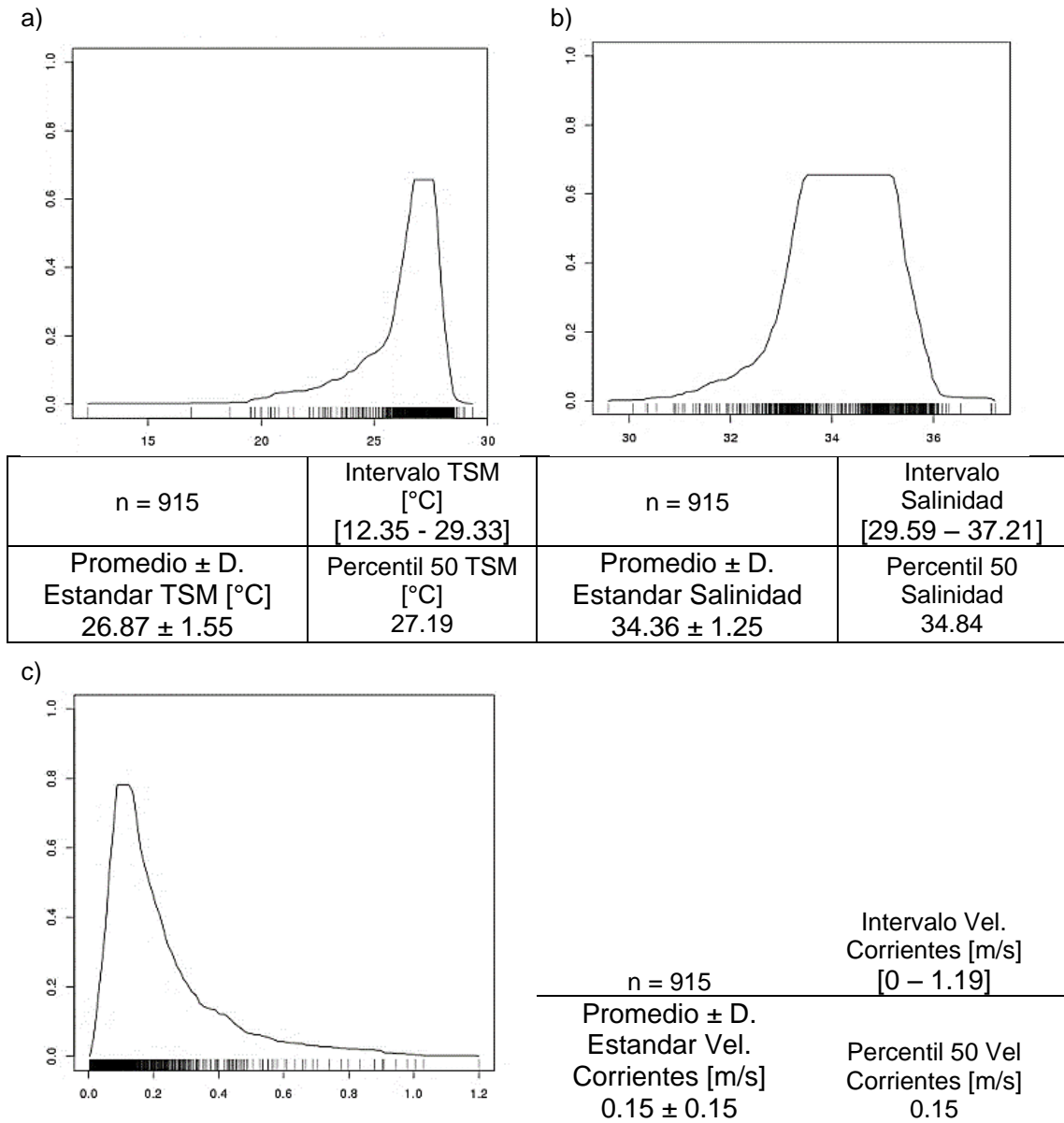
anteriores coinciden con las estimaciones del percentil 50 para cada variable: 26.93°C, salinidad de 33.75 y 0.1 m/s correspondientemente (Figura 36).



**Figura 36.** Curvas de respuesta y estadística descriptiva de a) TSM, b) Salinidad y c) Velocidad de las corrientes para *K. pelamis*, generadas con el modelo Bioclim.

La probabilidad de ocurrencia del dorado se relacionó con valores de temperatura entre 12.35°C y 29.33°C, salinidad de 29.59 a 37.21 y velocidad de corrientes desde 0 hasta 1.19 m/s. La mayor probabilidad de presencia fue en torno a 27°C, salinidad de 35 y velocidad de corrientes de 0.1 m/s, valores que concuerdan con

los percentiles 50 para cada variable: 27.19 °C, 34.84 y 0.15 m/s respectivamente (Figura 37).



**Figura 37.** Curvas de respuesta y estadística descriptiva de a) TSM, b) Salinidad y c) Velocidad de las corrientes para *C. hippurus*, generadas con el modelo Bioclim.

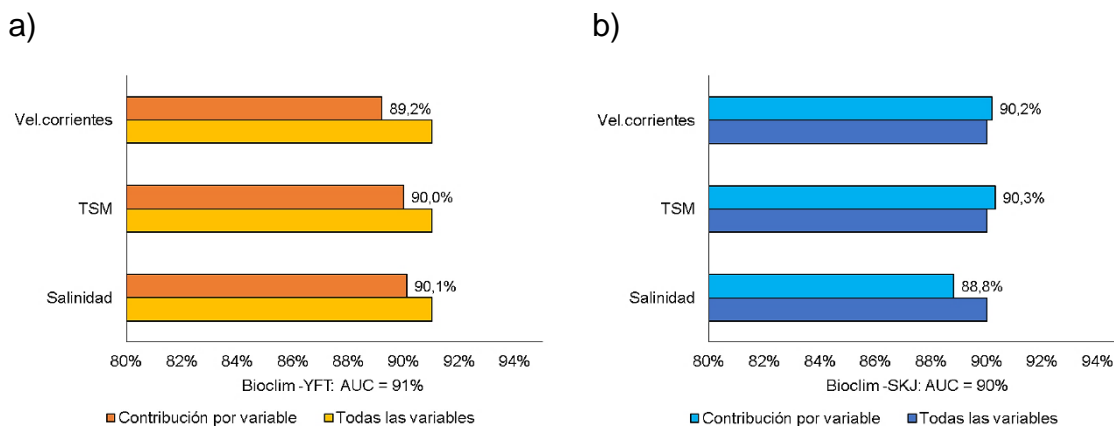
En resumen, la probabilidad de presencia de *T. albacares*, *K. pelamis* y *C. hippurus* abarcó un intervalo de temperatura entre los 12 °C y 30 °C, de salinidades entre 29.5 y 38 y velocidades de corrientes entre 0 y 1 m/s. La mayor probabilidad de ocurrencia para las especies (entre 0.70 y 0.80), se relacionó con sitios con

temperaturas cercanas a 27°C, salinidades de 34 y velocidad de corrientes de 0.1 m/s.

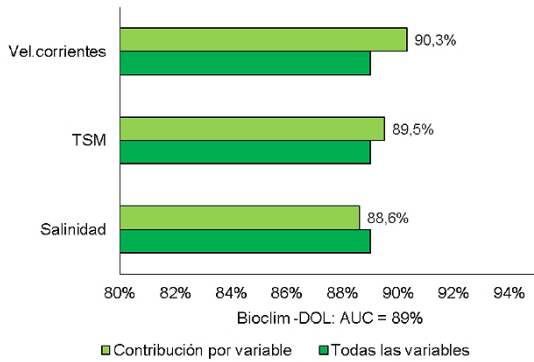
### 3.3. Contribución de los predictores ambientales y prueba de Jackknife

Los resultados de la prueba de *Jackknife* para evaluar el aporte de las tres variables ambientales a la distribución potencial actual estimada con Bioclim para *T. albacares*, mostraron que la temperatura superficial del agua, la salinidad y la velocidad de las corrientes tienen porcentajes de contribución similares al evaluar el modelo con cada predictor por separado, alcanzando valores de AUC de 89.2% para la velocidad de las corrientes, 90% para la TSM y 90.1% para la salinidad. Los resultados anteriores son similares a lo observado para *K. pelamis*, especie para la cual el modelo de Bioclim evaluado inicialmente con la velocidad de las corrientes alcanzó un AUC de 90.2%, posteriormente con la TSM obtuvo un AUC de 90.3% y por último con la salinidad logró un AUC 88.8%. Para el caso del dorado, la prueba de *Jackknife* también indicó ajustes similares a lo descrito previamente: AUC de modelo solo con velocidad de las corrientes: 90.3%, considerando solo TSM: 89.5% y la salinidad superficial: 88.6%.

En resumen, la contribución de los tres predictores ambientales a la distribución potencial actual de *T. albacares*, *K. pelamis* y *C. hippurus* estimadas con Bioclim fue similar en cada caso, alcanzando ajustes (AUC) entre 88% y 90% para cada una de las variables ambientales (Figura 38).



c)



**Figura 38.** Resultados de prueba *Jackknife* señalando la contribución de las variables ambientales a los modelos de Bioclim en condiciones iniciales para a) *T. albacares*, b) *K. pelamis* y c) *C. hippurus*.

### 3.4. Mapas de distribución potencial e idoneidad de hábitat

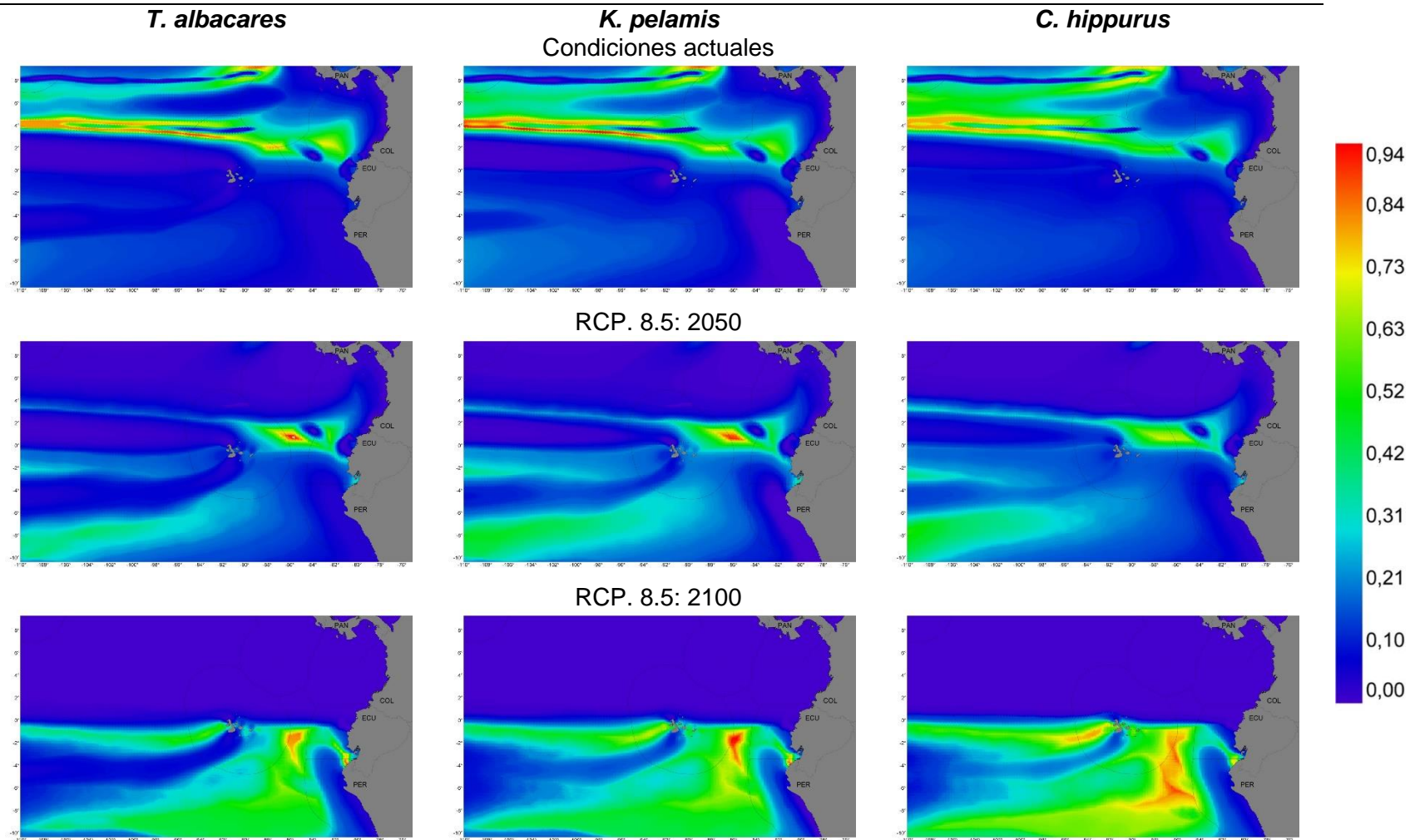
Aunque los modelos de distribución potencial de las especies se generaron globalmente (distribución mundial de las ocurrencias), para el desarrollo de los objetivos de esta tesis, la presentación de resultados, discusión y conclusiones se hizo específicamente para el et-POT. Además, es importante mencionar que no fue necesario realizar ensambles de modelos dado que se seleccionó a Bioclim como el modelo de distribución potencial más acertado para las tres especies, según los resultados descritos previamente, además de las características del algoritmo seleccionado.

Los mapas generados a partir de los modelos de Bioclim y las curvas de respuesta para *T. albacares* en condiciones actuales mostraron que, en el et-POT, la zona más idónea para la presencia de esta especie se presentó como una franja horizontal ubicada entre los 2 y 4 grados de latitud norte, extendiéndose desde la zona transfronteriza Colombia-Ecuador (aproximadamente desde los 82 grados de longitud oeste) hasta aguas internacionales. En esta zona, la idoneidad alcanzó los valores más altos: entre 0.65 y 0.80, contrastando con el área comprendida entre la línea ecuatorial y los 10 grados de latitud sur, en la cual las condiciones ambientales no serían las más adecuadas para la presencia del YFT, representado por una idoneidad menor a 0.2 (Figura 39 superior). La franja de mayor idoneidad para *T. albacares* descrita previamente se redujo longitudinalmente al proyectar los

resultados en el escenario de cambio climático RCP 8.5 para el año 2050, restringiéndose la posibilidad de ocurrencia de esta especie a un área comprendida entre los 82 y 92 grados de longitud oeste, zona en la cual la idoneidad alcanzaría valores cercanos a 0.90.

Adicional a la disminución de la franja de idoneidad, los resultados de Bioclim según el escenario de cambio climático más extremo para el año 2050 sugieren una nueva región con las condiciones óptimas donde podría ubicarse *T. albacares*. Esta zona se ubica entre los 9 y 10 grados de latitud sur y se extiende desde los 92 grados de longitud oeste, hacia aguas internacionales. Si bien la idoneidad para la especie en esta nueva zona proyectada al año 2050 es baja, cercana al 0.42 (Figura 39 centro), los resultados obtenidos según el RCP 8.5 al año 2100 indican que esta nueva zona podría alcanzar máximos de idoneidad cercanos a 0.80, además de ampliar su cobertura espacial (Figura 39 inferior). Llama la atención que para el año 2100, la zona menos apta para la presencia potencial de la especie se ubicó entre la línea ecuatorial y los 9 grados de latitud norte, siendo esto completamente opuesto a lo presentado en el mapa de idoneidad para condiciones iniciales.

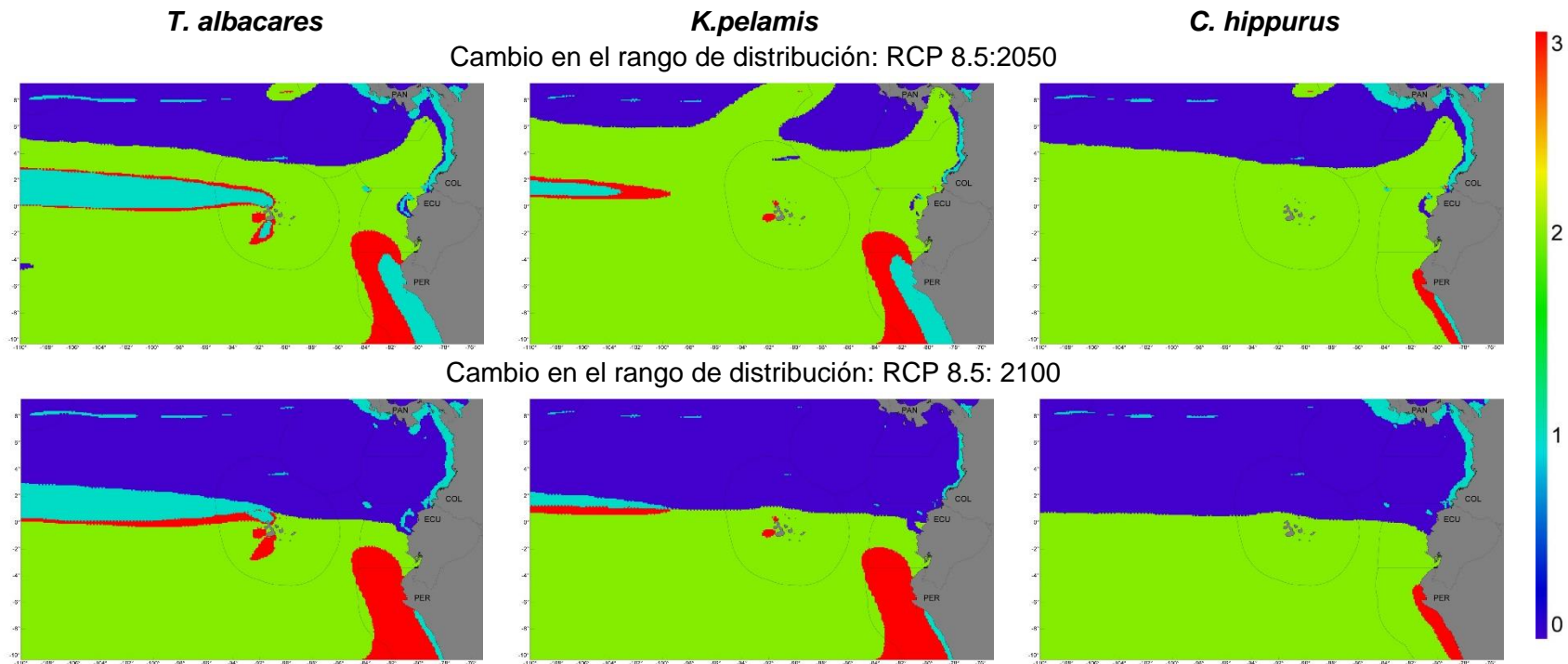
Los mapas de idoneidad de hábitat propuestos para *K. pelamis* y *C. hippurus* fueron muy similares a lo descrito para *T. albacares*, identificándose zonas de condiciones más favorables distribuida longitudinalmente al norte de la línea ecuatorial. Al pronosticar su distribución al año 2050 se observó la misma disminución y reubicación de dicha zona para finalmente en el año 2100, ubicarse principalmente al sur de la línea ecuatorial, con condiciones más favorables distribuidas a partir de los 82 grados de longitud oeste, hacia aguas internacionales (Figura 39).



**Figura 39.** Mapas de idoneidad de hábitat para *T. albacares* (izquierda), *K. pelamis* (centro) y *C. hippurus* (derecha), en condiciones actuales (superior), RCP. 8.5: 2050 (centro) y RCP 8.5: 2100 (inferior). Los valores de idoneidad de hábitat aumentan de 0 a 0.94, siendo este último valor el indicador de las mejores condiciones ambientales para la posible presencia de la especie.

Lo descrito con respecto a una posible redistribución de las zonas idóneas que favorecerían la presencia de los atunes y el dorado en el et-POT concuerda con los pronósticos para los cambios de rango de distribución para los años 2050 y 2100 en el escenario de cambio climático RCP 8.5. Para *T. albacares*, la región con las condiciones ambientales más propicias mostró un cambio de posición importante con tendencia hacia el sur, además de una reducción general en aproximadamente un tercio de su cobertura para el año 2050 (Figura 40 superior). A pesar de esta reducción, el CMAR seguiría ofreciendo condiciones favorables para la presencia de esta especie al año 2050, situación que cambiaría según el pronóstico al año 2100. Para esta época, la contracción del territorio con condiciones idóneas para la presencia de *T. albacares* sería principalmente en el CMAR (Figura 40 inferior), además de mantenerse la reducción pronosticada para el año 2050. Si bien se estaría pronosticando una pérdida de territorio favorable al norte de la línea ecuatorial, al sur, paralelo al borde costero y alcanzando la frontera entre Ecuador y Perú, se estaría proyectando una nueva zona cuyas condiciones ambientales, desfavorables en la actualidad, al año 2050 y 2100, serían adecuadas para la presencia de esta especie.

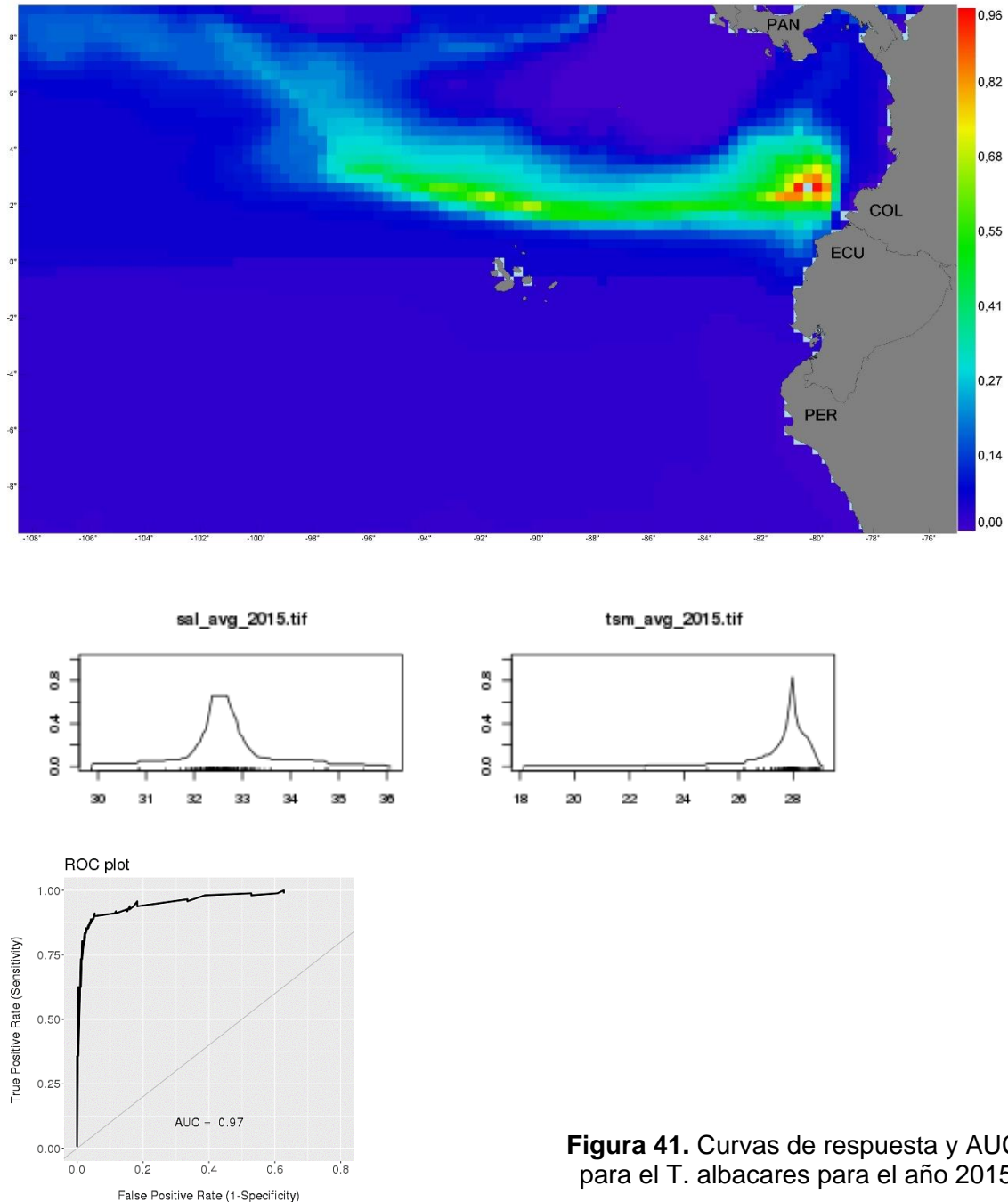
Los cambios en los rangos de distribución para *K. pelamis* y *C. hippurus* fueron similares en dirección y pérdida de territorio. Sin embargo, la expansión del territorio con condiciones de temperatura superficial, salinidad y velocidad de las corrientes favorables pronosticada para *C. hippurus* fue de una magnitud mucho menor a lo sugerido para las especies de atún, aunque la ubicación fue la misma (Figura 40).



**Figura 40.** Cambios en el rango de distribución de *T. albares* (izquierda), *K. pelamis* (centro) y *C. hippurus* (derecha), según RCP. 8.5: 2050 (superior) y RCP. 8.5: 2100 (inferior). La pérdida o contracción de territorio idóneo para las especies se indica con azul oscuro (No. 0), áreas carentes de información en azul claro (No.1), zonas con presencias y sin cambios en verde (No. 2) nuevas zonas idóneas-expansión en rojo (No. 3).

### 3.5. Validación del modelo

La distribución potencial calculada para el atún aleta amarilla a partir del subconjunto de datos del 2015 concuerda con lo descrito para condiciones actuales, además tuvo un ajuste del 0.97 y valores de temperatura y salinidad cercanos a lo estimado para esta especie en condiciones actuales



**Figura 41.** Curvas de respuesta y AUC para el T. albacares para el año 2015.

---

## 4. Discusión

### 4.1. Sobre los modelos de distribución de especie, distribuciones potenciales e idoneidad ambiental en condiciones actuales

Las técnicas de modelado de distribución de especies y de nicho ecológico se han aplicado principalmente a contextos terrestres, ya que usar información biológica marina representa retos como el acceso a diferentes profundidades, muestreos distantes de la costa y movilidad de las especies de interés (Melo-Merino, Reyes-Bonilla, & Lira-Noriega, 2020). Además de la dificultad para acceder a información confiable de presencias de especies marinas, es igual o más difícil acceder a registros de ausencias de estas especies, aspecto que resulta indispensable para el correcto funcionamiento de, por ejemplo, algoritmos basados en técnicas de regresión y aprendizaje automático (Brosse et al., 1999; Manel, Williams, & Ormerod, 2001). Aunque los modelos basados en datos de presencia-ausencia han mostrado buenos desempeños para especies marinas (Alabia et al., 2015; Ferrari et al., 2018; Herrera Montiel et al., 2019), MacLeod y colaboradores (2008) sugieren que los modelos basados en información de solo presencias también pueden ser confiables y acertados para estudios en entornos marinos. Lo anterior concuerda con los resultados de los diferentes modelos de distribución generados para *T. albacares*, *K. pelamis* y *C. hippurus*, en los cuales los modelos que incluyeron pseudoausencias (GLM, MaxEnt, GAM, BRT, MARS, CTA, FDA, ANN y GBM) y el Bioclim que solo usa presencias, tuvieron desempeños similares con ajustes entre 0.89 y 1.00. Sin embargo, al recordar el sesgo espacial y temporal asociado a la información colectada por el POPC y el amplio rango de tolerancia ambiental reportado para estas especies, resulta conveniente seleccionar el Bioclim como el modelo para estimar la distribución potencial e idoneidad ambiental de estas tres especies en condiciones actuales y proyectar los resultados en escenarios de cambio climático. Por un lado, se descartaría la posibilidad de incluir falsas pseudoausencias dentro de los análisis y por otro lado, se podría aplicar el principio de parsimonia (Coelho, Diniz-Filho, & Rangel, 2019) al tratarse de un modelo cuyo

---

funcionamiento es más sencillo, a comparación de los otros modelos, pero con buenos desempeños igualmente. Bioclim es un modelo de perfil que define el espacio multidimensional ambiental a partir de los valores máximos y mínimos de los predictores ambientales seleccionados para todos los registros de presencia de la especie de interés. Para predecir la probabilidad de ocurrencia de una especie en una ubicación determinada, Bioclim compara los valores de las variables ambientales en dicha ubicación con la distribución de los valores de los percentiles en los sitios donde se reportó la especie. Se hace especial referencia al percentil 50 (mediana de los datos) ya que divide los datos a la mitad, indicando que una mayor cercanía del valor de cada variable ambiental al percentil 50 calculado para la variable, representa mayor probabilidad de encontrar la especie en la ubicación desconocida (Booth, Nix, Busby, & Hutchinson, 2014; Thuiller et al., 2012). Las curvas de respuesta obtenidas con el Bioclim y específicamente el valor del percentil 50 calculado para la temperatura del agua, la salinidad y la velocidad de las corrientes, confirman que las condiciones ambientales más favorables para la ocurrencia de *T. albacares*, *K. pelamis* y *C. hippurus*, son entornos marinos principalmente tropicales, con salinidades cercanas a 34 y temperaturas cercanas a 27°C. Al proyectar geográficamente los gradientes de idoneidad ambiental definidos por las curvas de respuesta generados con Bioclim, se obtuvieron mapas muy similares para las tres especies. La similitud en estos mapas es una posible consecuencia de la baja selectividad de la red de cerco como método de pesca (FAO, 1990) y la tendencia que tienen estas especies a asociarse formando cardúmenes incluyendo una o varias de las especies de este estudio (Sharp, 2001). Esto se traduce en la posibilidad de asignar las mismas coordenadas de presencia (coordenadas de lance) a registros de especies diferentes. Aun así, la franja de idoneidad ambiental en condiciones actuales proyectada para las tres especies coincide geográficamente con una zona donde confluyen masas de agua de características físicas y nutricionales contrastantes. El gradiente físico y bioquímico longitudinal formado en esta zona se conoce como frente oceánico y han sido reportado previamente para el POT (Asto et al., 2019; Pak & Zaneveld, 1974). Los frentes oceánicos se caracterizan por ser zonas altamente productivas (Mugo,

---

Saitoh, Takahashi, Nihira, & Kuroyama, 2014; Verneil, Franks, & Ohman, 2019; Wall et al., 2008) que activan la cadena alimenticia y ciclo de vida de diferentes especies marinas incluidos los atunes y el dorado (Cai et al., 2020; Lehodey, 2001; Matsumoto et al., 1984; Richardson et al., 2009), además de presentar oscilaciones horizontales y longitudinales relacionados con cambios en la temperatura y salinidad del agua principalmente (Grados et al., 2018; Nieblas, Demarcq, Drushka, Sloyan, & Bonhommeau, 2014).

Si bien los predictores ambientales considerados en esta tesis permitieron definir las condiciones idóneas bajo las cuales los atunes y el dorado podrían estar presentes en el POT actualmente, es importante recordar que estas especies son predadores oportunistas y basan su alimentación en diferentes grupos taxonómicos (Baque-Menoscal, Páez-Rosas, & Wolff, 2012; Lasso & Zapata, 1999; Sakamoto & Kojima, 1999; Varela et al., 2017). Lo anterior se relaciona con una alta capacidad migratoria (K. M. Schaefer, Fuller, & Block, 2011) y velocidad de desplazamiento de estas especies (entre 4 y 12 m/s) (Svendsen et al., 2016; Walter & Fierstine, 1964), aspectos derivados de una eficiente conducción de impulsos nerviosos y contracción muscular, todos asociados a un sistema circulatorio contracorriente y altas tasas metabólicas (Carey & Teal, 1966; Korsmeyer, Dewar, Lai, & Graham, 1996). Esta combinación de factores fisiológicos permiten la búsqueda de presas en zonas con características ambientales contrastantes y apartadas (Farrell et al., 2014; Laurs, Fiedler, & Montgomery, 1984). En ese orden de ideas, se ha sugerido que la distribución de especies pelágicas como el atún aleta amarilla, barrilete y dorado estaría relacionada de forma más directa con la disponibilidad y distribución de alimento que con características ambientales específicas (Logan et al., 2013; Mackenzie, Payne, Boje, Høyer, & Siegstad, 2014; Olson et al., 2016).

#### *4.2. Sobre los pronósticos y cambios en el rango de distribución según el RCP 8.5*

Si bien en esta tesis no se analizó el impacto del ENSO en la distribución del atún aleta amarilla, el barrilete y el dorado en el POT, los efectos de la fase cálida del ENSO en estas pesquerías permite inferir las posibles consecuencias que el

---

incremento en la temperatura del agua podría tener sobre la presencia de estas especies bajo los escenarios de cambio climático presentados en el Quinto Informe de Evaluación (*Fifth Assessment Report – AR5*) del Panel Intergubernamental de Cambio Climático. Según el IPCC, el incremento en la temperatura del agua, con respecto a las mediciones realizadas entre 1970 y 2000, sería de 2°C o más a nivel mundial, siendo especialmente sensible el hemisferio norte. También se ha sugerido que el cambio climático bajo el escenario extremo RCP 8.5, denominado “Negocios como de costumbre” (*“Business as usual”*), tendría consecuencias directas y mayores en zonas con temperaturas iguales o mayores a 28°C (Combal & Fischer, 2016), siendo el POT una de estas posibles zonas.

A raíz del calentamiento del agua producto del cambio climático de origen antropogénico, algunas especies estarían reaccionando de forma similar a lo reportado durante las fases cálidas del ENSO en el Océano Pacífico: extendiendo y redefiniendo su rango de distribución al desplazarse desde zonas cálidas a regiones de menor temperatura en sentido norte o sur (Fernandes et al., 2013; Silva et al., 2016; Zhang, Xu, Capinha, Weterings, & Gao, 2019), fenómeno conocido como *tropicalización de los ecosistemas marinos* (Cheung, Meeuwig, et al., 2012). Estos cambios en dirección, extensión e incluso pérdida de hábitats se deben, posiblemente, a que las zonas donde habitualmente se reportaban las especie ya no estarían ofreciendo las condiciones ambientales adecuadas para su permanencia y desarrollo tales como disponibilidad de alimento y eficiencia de sus actividades fisiológicas (Pörtner & Knust, 2007). Considerando lo anterior, el pronóstico de reubicación de las zonas de mayor idoneidad ambiental para *T. albacares*, *K. pelamis* y *C. hippurus* al sur de la línea ecuatorial para los años 2050 y 2100, además de una posible pérdida de hábitat en la zona del CMAR por posible incremento en la temperatura del agua es similar a las consecuencias del cambio climático estimadas en diferentes regiones (Lam, Cheung, Reygondeau, & Rashid Sumaila, 2016), incluyendo el POT (Herrera Montiel et al., 2019). Sin embargo, considerando que los atunes y el dorado se consideran especies depredadoras oportunistas en la cúspide de la cadena trófica, se ha sugerido que una aproximación más acertada de los efectos del cambio climático sobre estas

---

pesquerías debe incluir estudios enfocados a los efectos sobre la dinámica predador-presa en la cadena trófica de estas especies ya que los cambios en su distribución podrían estar respondiendo más a la disponibilidad de alimento que al calentamiento del agua (Evans et al., 2020; IATTC, 2014).

## 5. Conclusiones y recomendaciones

### 5.1. *Sobre los modelos de distribución de especie, distribuciones potenciales e idoneidad ambiental en condiciones actuales y futuras*

Para condiciones actuales, fue posible explicar la distribución potencial e idoneidad de hábitat para el dorado y atún a partir de la temperatura superficial del agua, la salinidad y velocidad de las corrientes, aceptándose la primera hipótesis planteada en esa tesis. Sin embargo, es importante considerar que existen otros predictores ambientales como la concentración de pigmentos fotosintéticos y nutrientes que podrían influir también en los rangos de distribución de estas especies. Por lo anterior, se recomienda desarrollar estudios futuros que incluyan otros predictores ambientales complementarios a las variables físicas incluidas en este estudio.

Después de comparar los desempeños y curvas de respuesta de los 10 algoritmos empleados para analizar la distribución potencial de *T. albacares*, *K. pelamis* y *C. hippurus* (objetivo 1), los modelos más acertados fueron los obtenidos con el algoritmo Bioclim dada su sencillez, buen desempeño y funcionamiento exclusivamente a partir de registros de presencia de las especies (objetivo 2).

Según los resultados obtenidos con el algoritmo Bioclim, en el extremo oriental del Pacífico Oriental Tropical la mayor idoneidad ambiental se presenta en zonas con temperaturas cercanas a 27°C, salinidad de 34 y velocidad de corrientes de 0.1 m/s (objetivo 2). A partir de esta información, se recomienda el desarrollo de estudios que contribuyan a una profundización en la caracterización biológica y ambiental

---

de áreas con estas características, con el fin de proyectar medidas de control y manejo de los recursos pesqueros presentes allí.

La proyección de las distribuciones potenciales obtenidas con Bioclim para el atún aleta amarilla, el dorado y el barrilete bajo el escenario de cambio climático más extremo, sugieren una redistribución de las zonas de mayor idoneidad de estas especies con respecto a las condiciones ambientales iniciales o actuales, con lo cual se acepta la segunda hipótesis planteada en este trabajo.

Los cambios en rango y dirección de las zonas de posible presencia de las especies consideradas en esta tesis tuvieron una tendencia latitudinal en sentido sur, lo cual es coherente con las consecuencias reportadas en la literatura sobre del cambio climático y los ecosistemas marinos (objetivo 3). A partir de esta información y dada la importancia comercial y nutricional de estas especies, se recomienda el planteamiento de estudios interdisciplinarios que permitan profundizar en las consecuencias socioeconómicas del cambio climático bajo el escenario RCP 8.5 para la región del et-POT en temas pesqueros. Se recomienda también el planteamiento de investigaciones enfocadas a posibles como cambios en el tipo y cantidad especies capturadas (objetivo e incidentales), costos en las faenas e ingresos generados.

No se descarta analizar a futuro los posibles cambios estacionales en la idoneidad ambiental a partir de la información reportada para los años 2010 y 2011 (años en los cuales el monitoreo fue mensual y continuo), pero considerando las posibles consecuencias indirectas que el evento frío ENSO (Niña) pudiera tener en la región en esa época.

---

## Conclusión General

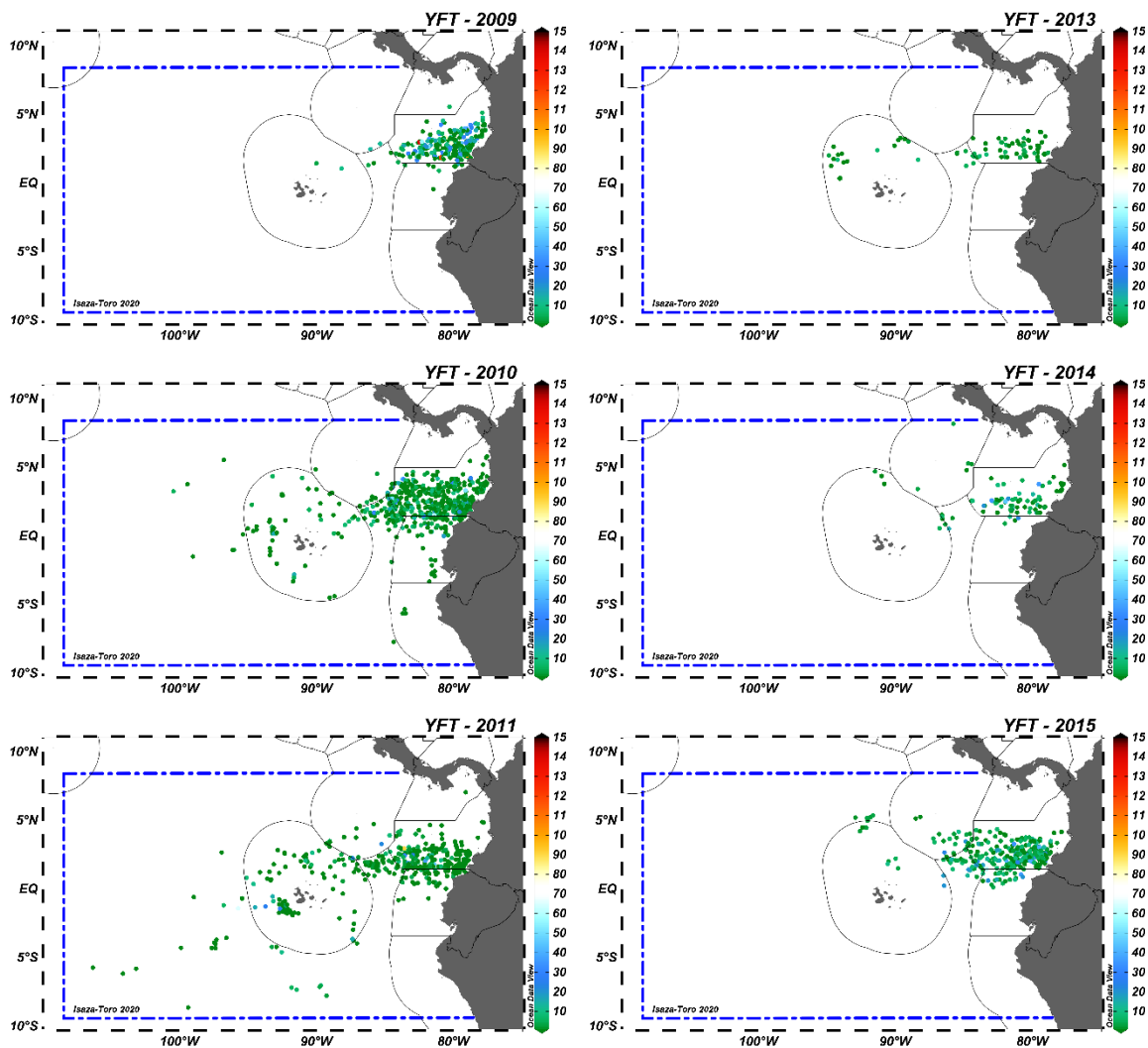
Se concluye que la información biológico-pesquera colectada en el marco del Programa de Observadores Pesqueros de Colombia es confiable para la generación de modelos de distribución potencial de especies comerciales y la estimación de posibles cambios en sus rangos de distribución frente a diferentes escenarios de cambio climático. Los cambios en el rango de distribución potencial y en las zonas de idoneidad ambiental estimados a partir de la temperatura superficial, la salinidad y velocidad de las corrientes para *T. albacares*, *K. pelamis* y *C. hippurus* en el extremo oriental del Pacífico Oriental Tropical se desplazarían en sentido sur en la medida en que el cambio climático siga la trayectoria del RCP 8.5, situación conocida como “tropicalización de las especies” y reportada en otras partes del mundo.

## Anexo A. Captura total de atunes y dorado, entre 2009 y 2015

**Tabla 19.** Captura total reportada para las 5 especies de atún (toneladas) y una especie de dorado (individuos).

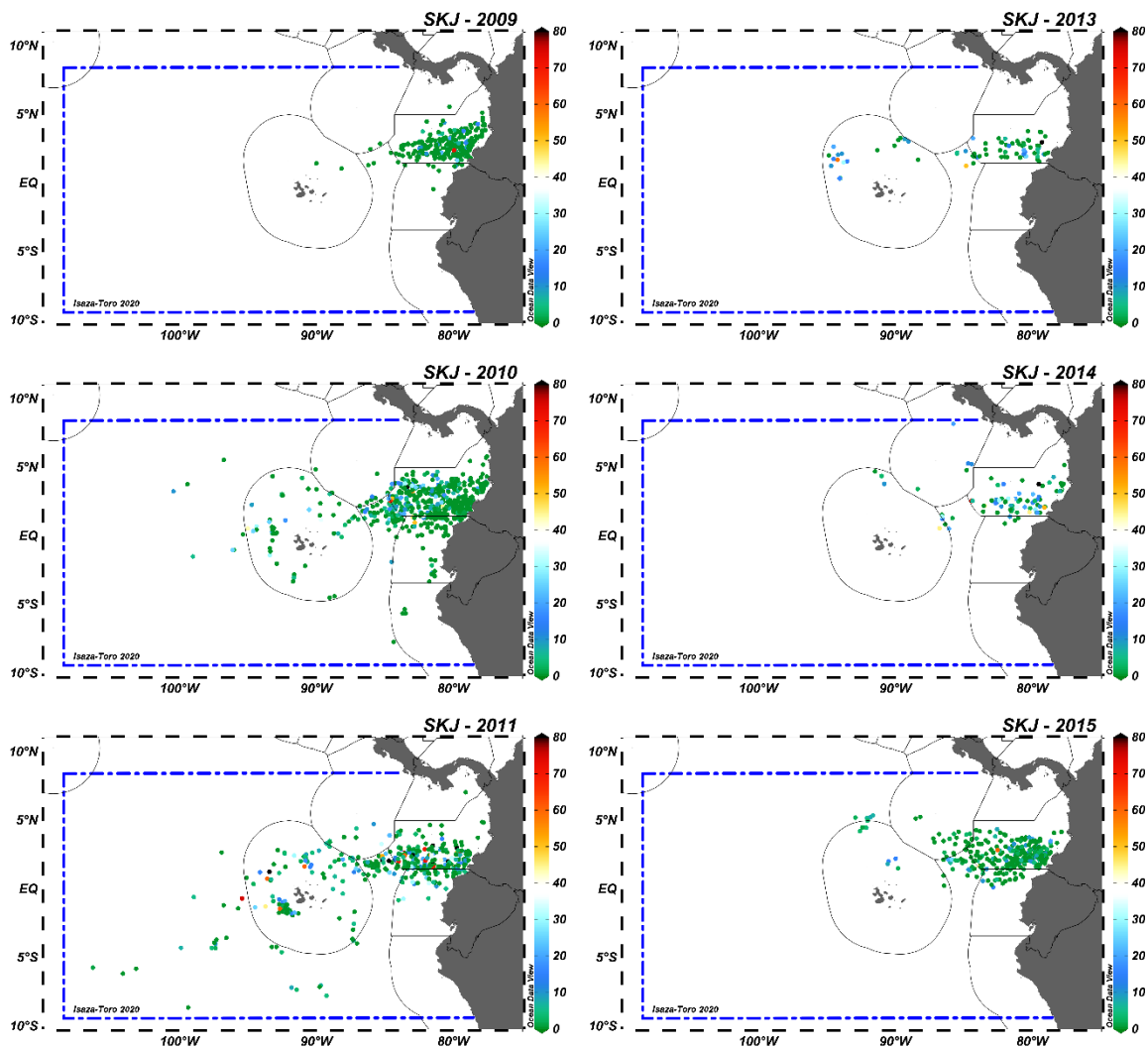
<b>Año</b>	<b>YFT [t]</b>	<b>SKJ [t]</b>	<b>BKJ [t]</b>	<b>BET [t]</b>	<b>BLT [t]</b>	<b>Subtotal año - atún</b>	<b>DOL [ind]</b>
2009	3960,5	841,14	462,4	169	0	5433,07	8601
2010	2610,25	3077	914,57	300	31,61	6933,36	9565
2011	1038,1	5296,7	405,78	21	35,48	6797,06	7694
2012	--	--	--	--	--	--	--
2013	134,5	593	98	0	0	825,5	1693
2014	491,5	1057	16	68	0	1632,5	1124
2015	2214	931	231	10	0	3386	1137
<b>Subtotal especie</b>	<b>10448,85</b>	<b>11795,84</b>	<b>2127,75</b>	<b>568</b>	<b>67,09</b>	<b>25007,49</b>	<b>29814</b>

## Anexo B. Distribución espacial de lances efectivos para *T. albacares*



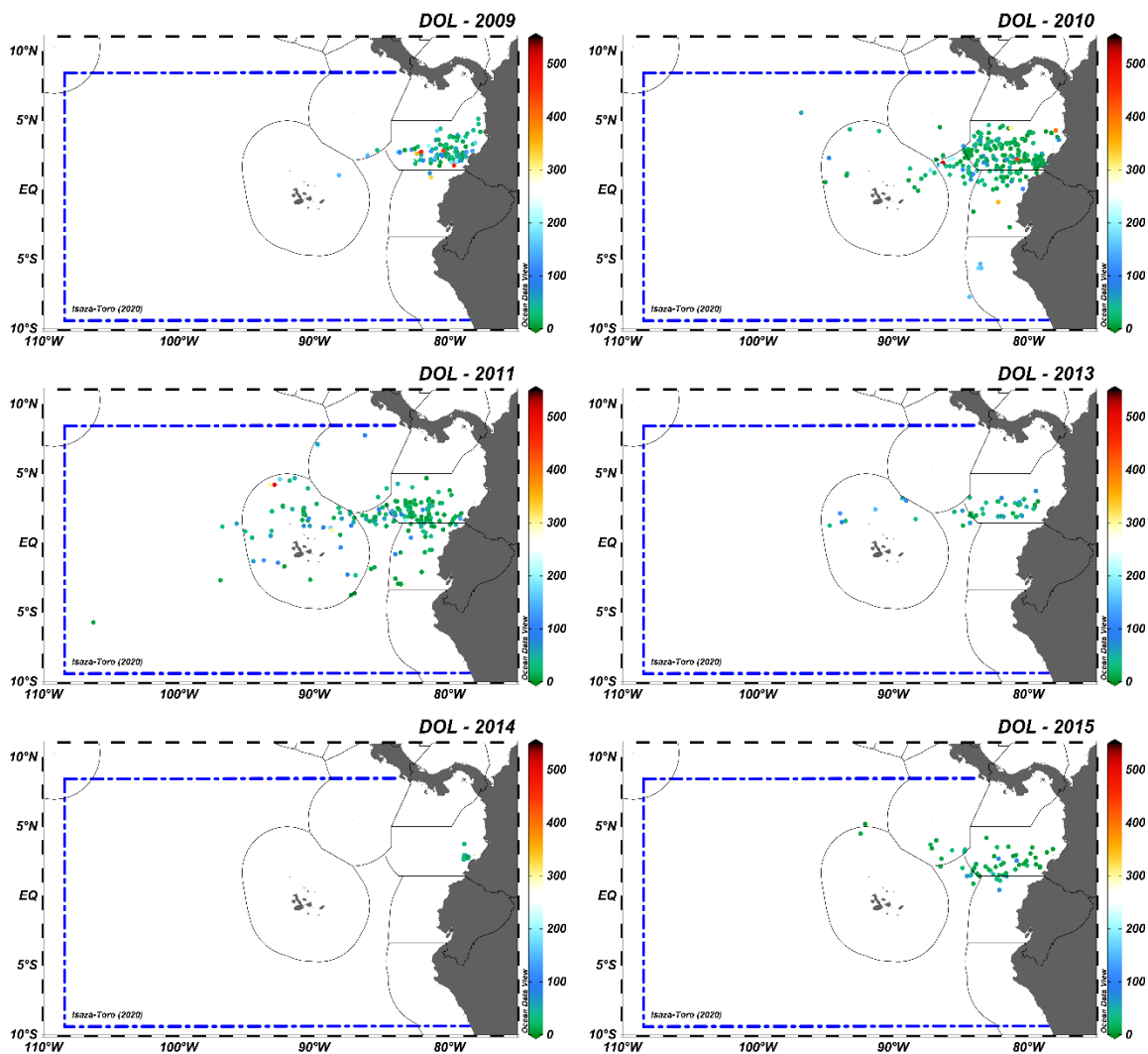
**Figura 42.** Distribución espacial anual de los lances efectivos para *T. albacares* reportados por el POPC entre 2009 y 2015.

## Anexo C. Distribución espacial de lances efectivos para *K. pelamis*



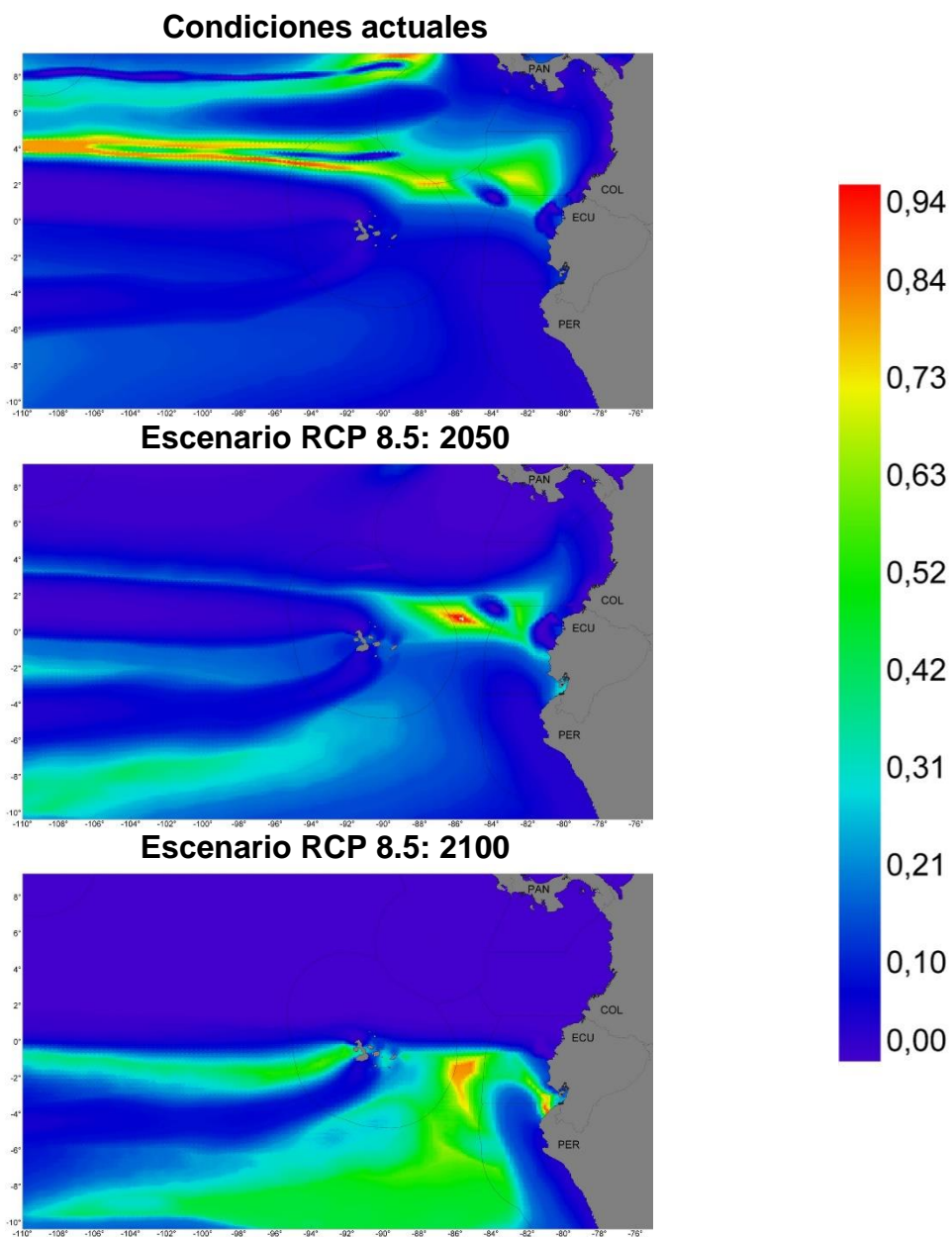
**Figura 43.** Distribución espacial anual de los lances efectivos para *K. pelamis* reportados por el POPC entre 2009 y 2015.

## Anexo D. Distribución espacial de lances efectivos para *C. hippurus*



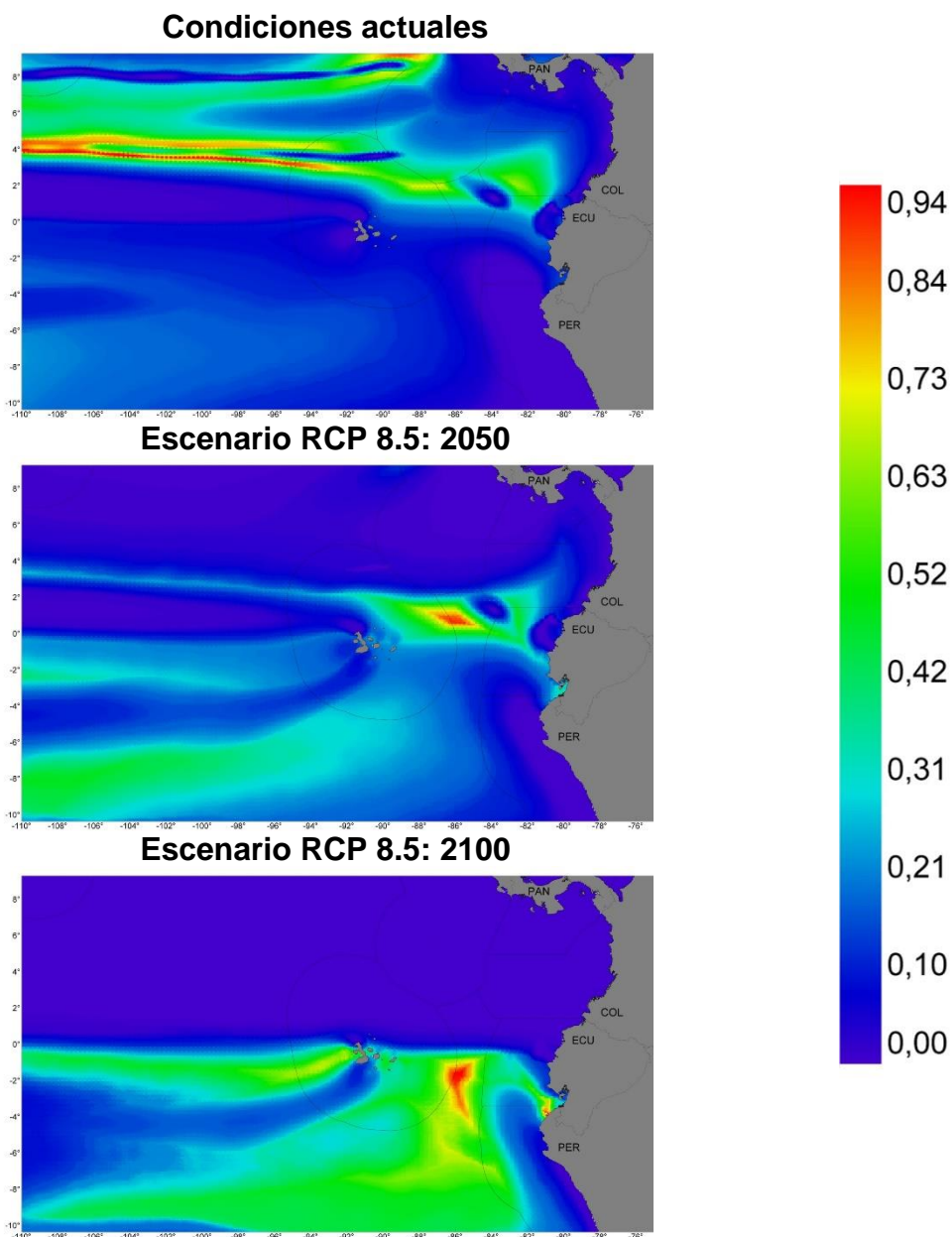
**Figura 44.** Distribución espacial anual de los lances efectivos para *C. hippurus* reportados por el POPC entre 2009 y 2015.

## Anexo E. Mapas de idoneidad de hábitat para *T. albacares* según Bioclim



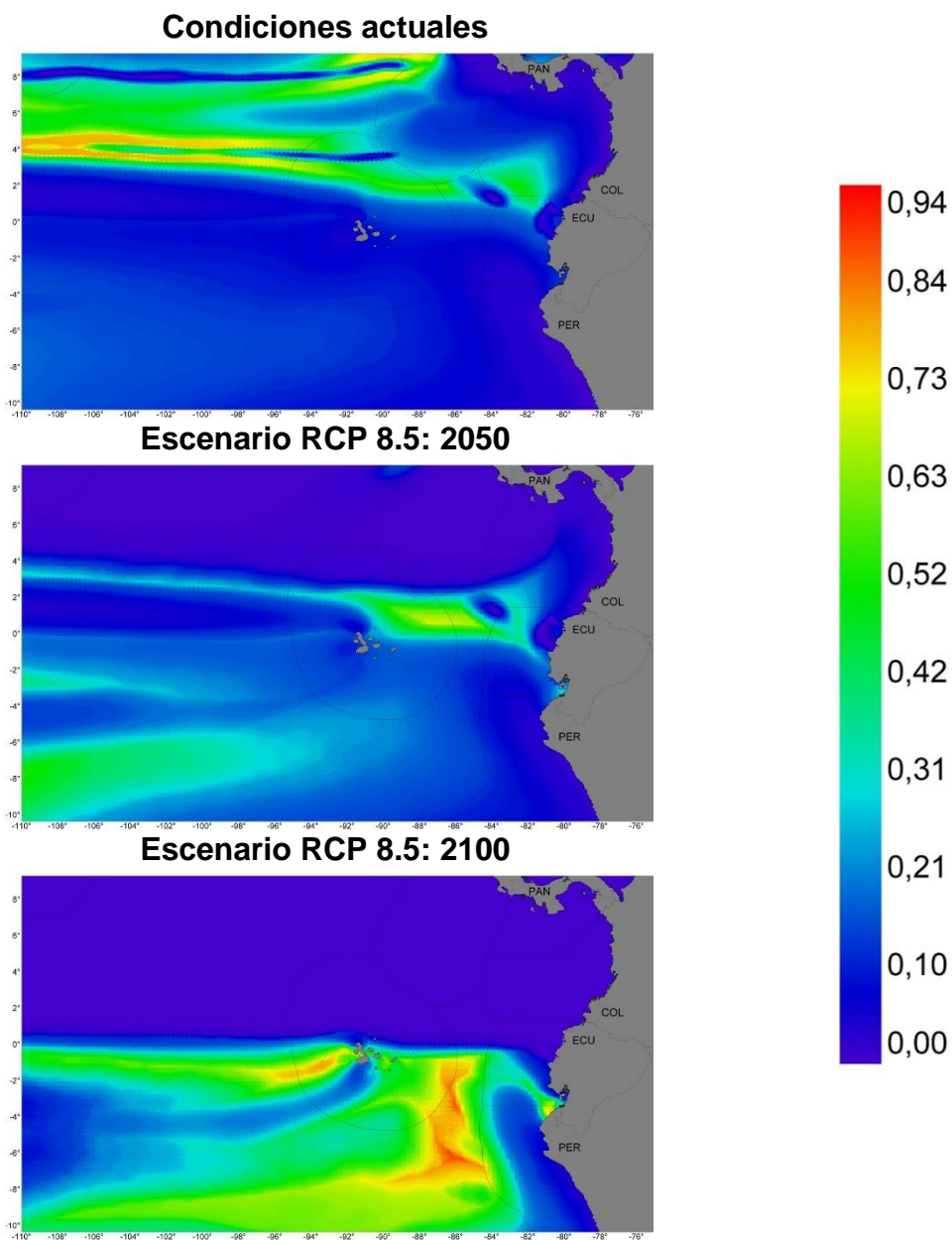
**Figura 45.** Mapas de idoneidad de hábitat para *T. albacares* según condiciones iniciales (superior), RCP 8.5: 2050 (centro) y RCP 8.5: 2100 (inferior).

## Anexo F. Mapas de idoneidad de hábitat para *K. pelamis* según Bioclim



**Figura 46.** Mapas de idoneidad de hábitat para *K. pelamis* según condiciones iniciales (superior), RCP 8.5: 2050 (centro) y RCP 8.5: 2100 (inferior).

## Anexo G. Mapas de idoneidad de hábitat para *C. hippurus* según Bioclim



**Figura 47.** Mapas de idoneidad de hábitat para *C. hippurus* según condiciones iniciales (superior), RCP 8.5: 2050 (centro) y RCP 8.5: 2100 (inferior).

## Anexo H. Socialización de resultados

A la fecha, la socialización de resultados se describe en la Tabla 20.

**Tabla 20.** Listado de publicaciones.

Título de la publicación científica	Revista	Estado
<i>Standardization of small purse seiner fishing effort and its relation to fishing grounds in the eastern tropical sector of the Eastern Pacific Ocean.</i>	Regional Studies in Marine Sciences	Publicado: <a href="https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101432">https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101432</a>
<i>Fish Aggregating Devices in the Eastern Tropical Pacific Marine Corridor – CMAR, according to the Colombian Fisheries Observer Program.</i>	Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems	Sometido a la revista para revisión (31/05/2020).
<i>Coryphaena hippurus as bycatch according to the Colombian Fisheries Observer Program</i>	Ciencias Marinas	Sometido a la revista para revisión (01/09/2020).
<i>Colombian Fisheries Observer Program as regional fisheries information source</i>	--	En escritura
<i>Fish Aggregating Devices as potential oceanographic monitoring platforms in the Eastern Tropical Pacific.</i>	--	En escritura.
<i>Análisis de la distribución potencial del <i>Coryphaena hippurus</i> en el Pacífico Oriental Tropical, bajo condiciones extremas de cambio climático.</i>	--	En escritura.

---

## Bibliografía

- Alabía, I. D., Saitoh, S. I., Mugo, R., Igarashi, H., Ishikawa, Y., Usui, N., ... Seito, M. (2015). Seasonal potential fishing ground prediction of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the western and central North Pacific. *Fisheries Oceanography*, *24*(2), 190–203. <https://doi.org/10.1111/fog.12102>
- Alejo-Plata, C., Díaz-Jaimes, P., & Salgado-Ugarte, I. H. (2011). Sex ratios, size at sexual maturity, and spawning seasonality of dolphinfish (*Coryphaena hippurus*) captured in the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Fisheries Research*, *110*(1), 207–216. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2011.04.008>
- Alonso, J., Blázquez, E., Isaza-Toro, E., & Vidal, J. (2015). Internal structure of the upwelling events at Punta Gallinas (Colombian Caribbean) from modis-sst imagery. *Continental Shelf Research*, *109*, 127–134. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.09.008>
- Amador, J. A., Alfaro, E. J., Lizano, O. G., & Magaña, V. O. (2006). Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, *69*(2–4), 101–142. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.007>
- Amoros, S., Gozzer, R., Melgar, V., & Rovergno, N. (2017). *Peruvian mahi mahi fishery (Coryphaena hippurus) characterization and analysis of the supply chain*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20284.74883>
- Apel, J. R. (1997). Three decades of satellite oceanography: The view from on high. In *COSPAR Colloquia Series* (Vol. 8). [https://doi.org/10.1016/S0964-2749\(97\)80003-0](https://doi.org/10.1016/S0964-2749(97)80003-0)
- Araujo, M., Pearson, R., Thuiller, W., & Erhard, M. (2005). Validation of species-climate impact models under climate change. *Global Change Biology*, *11*(9), 1504–1513. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001000.x>
- Arias Isaza, F. A., Antonio, T. G. J., Sandra, C. R., Sierra Correa, P. C., Carvajal, D., Hernandez Rueda, M., & Díaz Espinoza, L. (2015). *Evaluación directa de las poblaciones de peces grandes pelágicos del Pacífico y Caribe continental de Colombia*.
- Assis, J., Tyberghein, L., Bosch, S., Verbruggen, H., Serrão, E. A., & De Clerck, O. (2018). Bio-ORACLE v2.0: Extending marine data layers for bioclimatic modelling. *Global Ecology and Biogeography*, *27*(3), 277–284. <https://doi.org/10.1111/geb.12693>
- Asto, C., Chaigneau, A., & Gutiérrez, D. (2019). Spatio-temporal variability of the equatorial front in the eastern tropical Pacific from remote sensing salinity data (2010–2015). *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, *169–170*(November 2018), 104640. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2019.104640>

- Ateweberhan, M., & McClanahan, T. R. (2010). Relationship between historical sea-surface temperature variability and climate change-induced coral mortality in the western Indian Ocean. *Marine Pollution Bulletin*, 60(7), 964–970. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.03.033>
- AUNAP. *Resolución 798 de 2014: Por medio de la cual se implementan el procedimiento para la recolección y análisis de datos sobre dispositivos agregadores de peces.* , (2014).
- Baque-Menoscal, J., Páez-Rosas, D., & Wolff, M. (2012). Hábitos alimentarios de dos peces pelágicos thunnus albacares y Acanthocybium solandri de la reserva marina de galápagos. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 47(1), 1–11. <https://doi.org/10.4067/s0718-19572012000100001>
- Barber, R. T., & Chavez, F. P. (1983). Biological Consequences of El Niño. *Science*, 222(4629), 1203–1210. <https://doi.org/10.1126/science.222.4629.1203>
- Beardsley, G. L. (1967). Age, Growth, and Reproduction of the Dolphin, *Coryphaena hippurus*, in the Straits of Florida. *Copeia*, 1967(2), 441. <https://doi.org/10.2307/1442132>
- Becker, E. A., Forney, K. A., Fiedler, P. C., Barlow, J., Chivers, S. J., Edwards, C. A., ... Redfern, J. V. (2016). Moving towards dynamic ocean management: How well do modeled ocean products predict species distributions? *Remote Sensing*, 8(2), 1–26. <https://doi.org/10.3390/rs8020149>
- Bertrand, A., Lengaigne, M., Takahashi, K., Avadí, A., Poulain, F., & Harrod, C. (2020). El Niño Southern Oscillation (ENSO) effects on fisheries and aquaculture. In FAO (Ed.), *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 660*. <https://doi.org/10.4060/ca8348en>
- Booth, T. H., Nix, H. A., Busby, J. R., & Hutchinson, M. F. (2014). Bioclim: The first species distribution modelling package, its early applications and relevance to most current MaxEnt studies. *Diversity and Distributions*, 20(1), 1–9. <https://doi.org/10.1111/ddi.12144>
- Bosch, S., Tyberghein, L., Deneudt, K., Hernandez, F., & De Clerck, O. (2018). In search of relevant predictors for marine species distribution modelling using the MarineSPEED benchmark dataset. *Diversity and Distributions*, 24(2), 144–157. <https://doi.org/10.1111/ddi.12668>
- Boustany, A. M., Matteson, R., Castleton, M., Farwell, C., & Block, B. A. (2010a). Movements of pacific bluefin tuna (*Thunnus orientalis*) in the Eastern North Pacific revealed with archival tags. *Progress in Oceanography*, 86(1–2), 94–104. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2010.04.015>
- Boustany, A. M., Matteson, R., Castleton, M., Farwell, C., & Block, B. A. (2010b). Movements of pacific bluefin tuna (*Thunnus orientalis*) in the Eastern North Pacific revealed with archival tags. *Progress in Oceanography*, 86(1–2), 94–104. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2010.04.015>
- Boyer, T. P., Baranova, O. K., Coleman, C., García, H. E., Grodsky, A., Locarnini, R. A., ... Zweng, M. M. (2018). *World Ocean Database* (A. V. Mishonov, Ed.).

- Briggs, J. C. (1961). The East Pacific Barrier and the Distribution of Marine Shore Fishes. *Evolution*, 15(4), 545. <https://doi.org/10.2307/2406322>
- Brosse, S., Guegan, J. F., Tourenq, J. N., & Lek, S. (1999). The use of artificial neural networks to assess fish abundance and spatial occupancy in the littoral zone of a mesotrophic lake. *Ecological Modelling*, 120(2–3), 299–311. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(99\)00110-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(99)00110-6)
- Cai, L. N., Xu, L. L., Tang, D. L., Shao, W. Z., Liu, Y., Zuo, J. C., & Ji, Q. Y. (2020). The effects of ocean temperature gradients on bigeye tuna (*Thunnus obesus*) distribution in the equatorial eastern Pacific Ocean. *Advances in Space Research*. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.030>
- Caldeira, R., Couvelard, X., Vieira, R., Lucas, C., Sala, I., & Casanova, I. V. (2016). Challenges of building an operational ocean forecasting system for small island regions: Regional to local. *Journal of Operational Oceanography*, 9(1), 12. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2016.1205304>
- Calle-Bonilla, I. C., Giraldo, A., & Cuéllar-Chacón, A. (2017). Variación espacio temporal del ensamble de larvas de peces coralinos en isla Gorgona, Pacífico colombiano. *Bulletin of Marine and Coastal Research*, 46(2). <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2017.46.2.728>
- Cannizzaro, L., D'Andrea, F., Potoschi, A., & Scalisi, M. (1999). Economic aspects of fishing of dolphinfish in Sicily. *Scientia Marina*, 63(3–4), 459–464.
- Carey, F. G., & Teal, J. M. (1966). Heat Conservation in Tuna Fish Muscle. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 56(5), 1464–1469. <https://doi.org/10.1073/pnas.56.5.1464>
- Castro, C., Van Waerebeek, K., Cárdenas, D., & Alava, J. (2020). Marine mammals used as bait for improvised fish aggregating devices in marine waters of Ecuador, eastern tropical Pacific. *Endangered Species Research*, 41(December), 289–302. <https://doi.org/10.3354/esr01015>
- Cayocca, B. F., Verney, R., Caillaud, M., Dussauze, M., Pineau, L., & Hir, P. Le. (2014). Development and validation of a sediment dynamics model within a coastal operational oceanographic system. *Mercator Ocean - Quarterly Newsletter*, (April), 76–86.
- CBD. (2013). *Report of the Eastern Tropical and Temperate Pacific Regional workshop to facilitate the description of ecologically or biologically significant marine areas*. Galapagos Island, Ecuador.
- CCO. *Resolución No. 030 de 2014. Por la cual se actualiza el Comité Técnico Nacional del Corredor Marino del Pacífico Este Tropical*. , (2014).
- Chavez, F. P., Buck, K. R., Service, S. K., Newton, J., & Barber, R. T. (1996). Phytoplankton variability in the central and eastern tropical Pacific. *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography*, 43(46), 835–+. [https://doi.org/10.1016/0967-0645\(96\)00028-8](https://doi.org/10.1016/0967-0645(96)00028-8)
- Chelton, D. B., Schlax, M. G., Lyman, J. M., & Johnson, G. C. (2003). Equatorially

- trapped Rossby waves in the presence of meridionally sheared baroclinic flow in the Pacific Ocean. *Progress in Oceanography*, 56(2), 323–380.  
[https://doi.org/10.1016/S0079-6611\(03\)00008-9](https://doi.org/10.1016/S0079-6611(03)00008-9)
- Cheung, W. W. L., Meeuwig, J. J., Feng, M., Harvey, E., Lam, V. W. H., Langlois, T., ... Pauly, D. (2012). Climate-change induced tropicalisation of marine communities in Western Australia. *Marine and Freshwater Research*, 63(5), 415–427.  
<https://doi.org/10.1071/MF11205>
- Cheung, W. W. L., Pinnegar, J., Merino, G., Jones, M. C., & Barange, M. (2012). Review of climate change impacts on marine fisheries in the UK and Ireland. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 22(3), 368–388.  
<https://doi.org/10.1002/aqc.2248>
- Coelho, M. T. P., Diniz-Filho, J. A., & Rangel, T. F. (2019). A parsimonious view of the parsimony principle in ecology and evolution. *Ecography*, 42(5), 968–976.  
<https://doi.org/10.1111/ecog.04228>
- Collette, B., Acero, A., Amorim, A. F., Boustany, A., Canales-Ramirez, C., Cardenas, G., Carpenter, K. E., ... Yanez, E. (2011). *Coryphaena hippurus*. Retrieved September 25, 2019, from The IUCN Red List of Threatened Species 2011 website:  
<https://www.iucnredlist.org/species/154712/4614989>
- Collette, B., Acero, A., Amorim, A. F., Boustany, A., Canales Ramirez, C., Cardenas, G., Carpenter, K. E., ... Yanez, E. (2011). *Thunnus albacares*. *The IUCN Red List of Threatened Species 2011: e.T21857A9327139*.  
<https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2011-2.RLTS.T21857A9327139.en>
- Collette, B. B., & Nauen, C. E. (1983). FAO Species Catalogue Vol . 2 Scombrids of the world an annotated and illustrated catalogue of Tunas, Mackerels, Bonitos and related species know to date. In *FAO Fisheries Synopsis* (Vol. 2). <https://doi.org/FAO> Fish. Synop. 125(2)
- Collette, B., & Heessen, H. (2015). *Katsuwonus pelamis*. *The IUCN Red List of Threatened Species 2015: e.T170310A18204104*.
- Combal, B., & Fischer, A. (2016). Models projections of ocean warming under “business as usual” and “moderate mitigation” scenarios. In U. N. E. Programme (Ed.), *The Open Ocean: Status and Trends*. (pp. 70–89). Nairobi.
- Coronado-Franco, K. V., Selvaraj, J. J., & Mancera Pineda, J. E. (2018). Algal blooms detection in Colombian Caribbean Sea using MODIS imagery. *Marine Pollution Bulletin*, 133(October 2017), 791–798.  
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.06.021>
- Corredor-Acosta, A., Acosta, A., Pizarro-Koch, M., Medell, J., & Sald, G. S. (2020). Spatio-Temporal Variability of Chlorophyll-A and Environmental Variables in the Panama Bight. *Remote Sensing*, 12. <https://doi.org/10.3390/rs12132150>
- CPPS. *Protocolo sobre el programa para el Estudio Regional del Fenómeno El Niño en el Pacífico Sudeste (ERFEN)*. , (1992).
- CPPS. (2010). *Red Regional de Áreas Costeras y Marinas Protegidas del Pacífico*

- Sudeste*. (p. 26; Comisión Permanente del Pacífico Sur, Ed.). p. 26. Guayaquil, Ecuador.
- CTN Diocean. (2016). *Manual de Referencia en Mejores Prácticas de Gestión de Datos Oceánicos*. <https://doi.org/10.26640/25392212.1.2016>
- Cuello, F., Duarte, L. O., Manjarrés, L., García, C., Magdalena, U., Mediante, A., & Geográfica, D. I. (2007). Spatial Distribution of Fisheries Variables and Oceanographic Parameters in the Upwelling Ecosystem off Colombia , Caribbean Sea . A Geographic Information System Approach. *Fisheries (Bethesda)*, (58), 13–20.
- D. Reidel Publishing Company. (1973). Astronautical Research 1972: Proceedings of the 23rd Congress of the International Astronautical Federation. Vienna, 8-15 October 1972. In L. G. Napolitano, P. Contensou, & W. F. Hilton (Eds.), *Astronautical Research 1972*. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-2576-8>
- D’Croze, L., & O’Dea, A. (2007). Variability in upwelling along the Pacific shelf of Panama and implications for the distribution of nutrients and chlorophyll. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 73(1–2), 325–340. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.01.013>
- Dagorn, L., Holland, K. N., & Filmlalter, J. (2010). Are drifting FADs essential for testing the ecological trap hypothesis? *Fisheries Research*, 106(1), 60–63. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2010.07.002>
- Dapp, D., Arauz, R., Spotila, J. R., & O’Connor, M. P. (2013). Impact of Costa Rican longline fishery on its bycatch of sharks, stingrays, bony fish and olive ridley turtles (*Lepidochelys olivacea*). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 448, 228–239. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2013.07.014>
- Devis-Morales, A., Schneider, W., Montoya-Sánchez, R. A., & Rodríguez-Rubio, E. (2008). Monsoon-like winds reverse oceanic circulation in the Panama Bight. *Geophysical Research Letters*, 35(20), 1–6. <https://doi.org/10.1029/2008GL035172>
- Díaz-Jaimes, P., Uribe-Alcocer, M., Rocha-Olivares, A., García-de-León, F. J., Nortmoon, P., & Durand, J. D. (2010). Global phylogeography of the dolphinfish (*Coryphaena hippurus*): The influence of large effective population size and recent dispersal on the divergence of a marine pelagic cosmopolitan species. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 57(3), 1209–1218. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2010.10.005>
- Díaz-Ochoa, J. A., & Quiñones, R. A. (2008). Relationship of precipitation, freshwater input, and sea level height with the abundance of the white shrimp (*Litopenaeus occidentalis*; Street, 1871) off Buenaventura, eastern tropical Pacific. *Fisheries Research*, 92(2–3), 148–161. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2008.01.002>
- Díaz, J. M., Vieira, C. A., & Melo, G. J. (Eds.). (2011). *Diagnóstico de las principales pesquerías del Pacífico colombiano*. Bogotá.: Fundación MarViva-Colombia.
- DIMAR. (2008). Gestión de datos e información oceanográfica Colombiana. (Dimar, Ed.). *Serie de Publicaciones Especiales.*, Vol. 6, p. 140. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Donguy, J. R., & Henin, C. (1980). Surface Conditions in the Eastern Equatorial Pacific

- Related To the Intertropical Convergence Zone of the Winds. *Deep-Sea Research, Part A: Oceanographic Research Papers*, 27(9 A Pt A), 693–714.
- Earth Observing System Data and Information System. (2019). Data Processing Levels. Retrieved June 2, 2020, from <https://earthdata.nasa.gov/collaborate/open-data-services-and-software/data-information-policy/data-levels>
- Emery, W. J., & Meincke, J. (1986). *Global water masses: summary and review* (Vol. 9, pp. 383–391). Vol. 9, pp. 383–391.
- Evans, K., Arrizabalaga, H., Brodie, S., Chang, C.-T., Llopiz, J., Phillips, J. S., & Weng, K. (2020). Comparative research on ocean top predators by CLIOTOP: Understanding shifts in oceanic biodiversity under climate change. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, (xxxx), 104822. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2020.104822>
- FAO. (1990). Definición y clasificación de las diversas categorías de artes de pesca. *FAO Fisheries Technical Paper.*, 222.
- Farrell, E. R., Boustany, A. M., Halpin, P. N., & Hammond, D. L. (2014). Dolphinfish (*Coryphaena hippurus*) distribution in relation to biophysical ocean conditions in the northwest Atlantic. *Fisheries Research*, 151, 177–190. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2013.11.014>
- Félix, F., Palacios, D. M., Salazar, S. K., Caballero, S., Haase, B. E. N., & Falconí, J. (2011). The 2005 Galápagos humpback whale expedition: A first attempt to assess and characterise the population in the Archipelago. *Journal of Cetacean Research and Management*, (SPEC. ISS. 3), 291–299.
- Fernandes, J. A., Cheung, W. W. L., Jennings, S., Butensch??n, M., De Mora, L., Fr??licher, T. L., ... Grant, A. (2013). Modelling the effects of climate change on the distribution and production of marine fishes: Accounting for trophic interactions in a dynamic bioclimate envelope model. *Global Change Biology*, 19(8), 2596–2607. <https://doi.org/10.1111/gcb.12231>
- Fernández-Álamo, M. A., & Färber-Lorda, J. (2006). Zooplankton and the oceanography of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69(2–4), 318–359. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.003>
- Ferrari, R., Malcolm, H., Neilson, J., Lucieer, V., Jordan, A., Ingleton, T., ... Hill, N. (2018). Integrating distribution models and habitat classification maps into marine protected area planning. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 212(July), 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.06.015>
- Fiedler, P. C., & Talley, L. D. (2006a). Hydrography of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69(2–4), 143–180. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.008>
- Fiedler, P. C., & Talley, L. D. (2006b). Hydrography of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69(2–4), 143–180. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.008>
- French, A., Mechler, R., Arestegui, M., MacClune, K., & Cisneros, A. (2020). Root causes

- of recurrent catastrophe: The political ecology of El Niño-related disasters in Peru. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 47, 101539. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101539>
- Fujioka, K., Fukuda, H., Tei, Y., Okamoto, S., Kiyofuji, H., Furukawa, S., ... Kitagawa, T. (2018). Spatial and temporal variability in the trans-Pacific migration of Pacific bluefin tuna (*Thunnus orientalis*) revealed by archival tags. *Progress in Oceanography*, 162(February), 52–65. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.02.010>
- Furukawa, S., Tsuda, Y., Nishihara, G. N., Fujioka, K., Ohshimo, S., Tomoe, S., ... Kawabe, R. (2014). Vertical movements of Pacific bluefin tuna (*Thunnus orientalis*) and dolphinfish (*Coryphaena hippurus*) relative to the thermocline in the northern East China Sea. *Fisheries Research*, 149, 86–91. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2013.09.004>
- Garcés-Vargas, J., Schneider, W., Abarca del Río, R., Martínez, R., & Zambrano, E. (2005). Inter-annual variability in the thermal structure of an oceanic time series station off Ecuador (1990–2003) associated with El Niño events. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 52(10), 1789–1805. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2005.05.008>
- García, H. E., Boyer, T. P., Baranova, O. K., Locarnini, R. A., Mishonov, A. V., Grodsky, A., ... Zweng, M. M. (2019). *World Ocean Atlas 2018: Product Documentation*. (A. V. Mishonov, Ed.).
- García, H. E., Boyer, T. P., Locarnini, R. A., Baranova, O. K., & Zweng, M. M. (2018). *World Ocean Database 2018: User's Manual (prerelease)*. (A. V. Mishonov, Ed.). Silver Spring, MD.
- Grados, C., Chaigneau, A., Echevin, V., & Dominguez, N. (2018). Upper ocean hydrology of the Northern Humboldt Current System at seasonal, interannual and interdecadal scales. *Progress in Oceanography*, 165(October 2016), 123–144. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.05.005>
- Grove, J. S., & Lavenberg, R. J. (1997). *Fishes of the Galápagos Islands*. Stanford University Press.
- Guisan, A., & Thuiller, W. (2005). Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8(9), 993–1009. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00792.x>
- Guisan, A., Thuiller, W., & Zimmermann, N. E. (2017). *Habitat Suitability and Distribution Models*. <https://doi.org/10.1017/9781139028271>
- Harpp, K. S., Mittelstaedt, E., D'Ozouville, N., & Graham, D. W. (2014). The Galapagos: A Natural Laboratory for the Earth Sciences. In *The Galapagos: A Natural Laboratory for the Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1002/9781118852538>
- Hayhoe, K., Edmonds, J., Kopp, R. E., LeGrande, A. N., Sanderson, B. M., Wehner, M. F., & Wuebbles, D. J. (2017). Climate Models, Scenarios, and Projections. *Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I, I*, 133–160. <https://doi.org/10.7930/J0WH2N54>

- Hernández-Santoro, C., Landaeta, M. F., & Castillo Pizarro, J. (2018). Effect of ENSO on the distribution and concentration of catches and reproductive activity of anchovy *Engraulis ringens* in northern Chile. *Fisheries Oceanography*, *00*, 1–15. <https://doi.org/10.1111/fog.12405>
- Herrera Montiel, S. A., Coronado-Franco, K. V., & Selvaraj, J. J. (2019). Predicted changes in the potential distribution of seerfish (*Scomberomorus sierra*) under multiple climate change scenarios in the Colombian Pacific Ocean. *Ecological Informatics*, *53*(July), 100985. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2019.100985>
- Herrón, P., Mildenerger, T. K., Díaz, J. M., & Wolff, M. (2018). Assessment of the stock status of small-scale and multi-gear fisheries resources in the tropical Eastern Pacific region. *Regional Studies in Marine Science*, *24*, 311–323. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2018.09.008>
- Holan, J. R., King, C. K., Proctor, A. H., & Davis, A. R. (2019). Increased sensitivity of subantarctic marine invertebrates to copper under a changing climate - Effects of salinity and temperature. *Environmental Pollution*, *249*, 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.02.016>
- Holmes, E. E., Lewis, M. A., Banks, J. E., & Veit, R. R. (1994). Partial Differential Equations in Ecology: Spatial Interactions and Population Dynamics. *Ecology*, *75*(1), 17–29. <https://doi.org/10.2307/1939378>
- Hosoda, K., Murakami, H., Sakaida, F., & Kawamura, H. (2007). Algorithm and validation of sea surface temperature observation using MODIS sensors aboard terra and aqua in the western North Pacific. *Journal of Oceanography*, *63*(2), 267–280. <https://doi.org/10.1007/s10872-007-0027-4>
- Hu, Z. M., & Fraser, C. (2016). Seaweed Phylogeography. In Z.-M. Hu & C. Fraser (Eds.), *Seaweed Phylogeography*. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-7534-2>
- IATTC. (2005). *Annual Report of the Inter-American Tropical Tuna Commission*.
- IATTC. (2009). *Definición de las clases de capacidad de los buques en relación con el requisito de llevar un observador a bordo MOP-21-07*. La Jolla, CA (EE.UU).
- IATTC. (2013). *Los atunes y peces picudos en el Océano Pacífico Oriental en el 2012*. Veracruz.
- IATTC. (2014). Tunas and billfishes in the eastern pacific ocean in 2013. In *Fishery Status Report No. 12*. La Jolla CA.
- IATTC. (2017a). *Resolución C-17-02: Medidas de Conservación para los Atunes Tropicales en el Océano Pacífico Oriental durante 2018-2020 y enmienda de la resolución C-17-01*. Ciudad de México, México.
- IATTC. (2017b). Species Codes. Retrieved May 7, 2020, from <https://www.iattc.org/Standard-Codes/StdSpeciesCodes1.htm>
- IATTC. *Resolution C-04-05 (Rev 3.1): Consolidated resolution on bycatch.* , (2019).
- ICA. *Resolución 2413 de 2008: Por el cual se adoptan para el año 2008 medidas de conservación sobre poblaciones de Túnidos y Especies Afines.* , (2008).

- IPCC. (2014a). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (V. . Barros, C. . Field, D. . Dokken, M. . Mastandrea, K. . Mach, T. . Bilir, ... L. . White, Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC. (2014b). Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. In *Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415416>
- Isaza-Toro, E. (2013). Comportamiento espacial de las variables químicas en la Cuenca Pacífica Colombiana - CPC LI. *Boletín Científico CIOH*, 31, 95–108.
- Isaza-Toro, E., Rodriguez, A., & Rueda, M. (2015). Variables oceanográficas y su relación con la abundancia del recurso. In INVEMAR & AUNAP (Eds.), *Evaluación directa de las poblaciones de peces grandes pelágicos del Pacífico y Caribe Continental de Colombia*. (pp. 93–107). Santa Marta.
- ISO. (2019). International Organization For Standardization. Retrieved October 28, 2019, from [www.iso.org](http://www.iso.org)
- Itano, D. G. (1996). *The Reproductive biology of yellowfin tuna (Thunnus albacares) in Hawaiian waters and the Western Tropical Pacific Ocean: Project Summary*.
- Kessler, W. S. (2006). The circulation of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69(2–4), 181–217. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.009>
- Kiyofuji, H., Aoki, Y., Kinoshita, J., Okamoto, S., Masujima, M., Matsumoto, T., & Fujioka, K. (2019). Progress in Oceanography Northward migration dynamics of skipjack tuna ( *Katsuwonus pelamis* ) associated with the lower thermal limit in the western Pacific Ocean. *Progress in Oceanography*, 175(March), 55–67. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2019.03.006>
- Klemas, V. (2013). Fisheries applications of remote sensing: An overview. *Fisheries Research*, 148, 124–136. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2012.02.027>
- Korsmeyer, K. E., Dewar, H., Lai, N. C., & Graham, J. B. (1996). The aerobic capacity of tunas: Adaptation for multiple metabolic demands. *Comparative Biochemistry and Physiology - A Physiology*, 113(1), 17–24. [https://doi.org/10.1016/0300-9629\(95\)02061-6](https://doi.org/10.1016/0300-9629(95)02061-6)
- Lam, V. W. Y., Cheung, W. W. L., Reygondeau, G., & Rashid Sumaila, U. (2016). Projected change in global fisheries revenues under climate change. *Scientific Reports*, 6, 6–13. <https://doi.org/10.1038/srep32607>
- Lasso, J., & Zapata, L. (1999). Fisheries and biology of *Coryphaena hippurus* (Pisces: Coryphaenidae) in the Pacific coast of Colombia and Panama. *Scientia Marina*, 63(3–4), 387–399. <https://doi.org/10.3989/scimar.1999.63n3-4387>
- Laurs, R. M., Fiedler, P. C., & Montgomery, D. R. (1984). Albacore tuna catch distributions relative to environmental features observed from satellites. *Deep Sea Research Part A, Oceanographic Research Papers*, 31(9), 1085–1099. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(84\)90014-1](https://doi.org/10.1016/0198-0149(84)90014-1)

- Lavín, M. F., Fiedler, P. C., Amador, J. A., Ballance, L. T., Färber-Lorda, J., & Mestas-Nuñez, A. M. (2006). A review of eastern tropical Pacific oceanography: Summary. *Progress in Oceanography*, 69(2–4), 391–398. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.005>
- Lehodey, P. (2001). The pelagic ecosystem of the tropical Pacific Ocean: Dynamic spatial modelling and biological consequences of ENSO. *Progress in Oceanography*, 49(1–4), 439–468. [https://doi.org/10.1016/S0079-6611\(01\)00035-0](https://doi.org/10.1016/S0079-6611(01)00035-0)
- Lehodey, P., Senina, I., Calmettes, B., Hampton, J., & Nicol, S. (2013). Modelling the impact of climate change on Pacific skipjack tuna population and fisheries. *Climatic Change*, 119(1), 95–109. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0595-1>
- Lessa, R., & Duarte-Neto, P. (2004). Age and growth of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the western equatorial Atlantic, using dorsal fin spines. *Fisheries Research*, 69(2), 157–170. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2004.05.007>
- Levitus, S. (1982). *Climatological Atlas of the World Ocean*. Princeton, N.J.
- Liu, Y., Xie, L., Morrison, J. M., & Kamykowski, D. (2013). *Dynamic Downscaling of the Impact of Climate Change on the Ocean Circulation in the Galápagos Archipelago*. 2013.
- Logan, J. M., Toppin, R., Smith, S., Galuardi, B., Porter, J., & Lutcavage, M. (2013). Contribution of cephalopod prey to the diet of large pelagic fish predators in the central North Atlantic Ocean. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 95, 74–82. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.06.003>
- Mackenzie, B. R., Payne, M. R., Boje, J., Høyer, J. L., & Siegstad, H. (2014). A cascade of warming impacts brings bluefin tuna to Greenland waters. *Global Change Biology*, 20(8), 2484–2491. <https://doi.org/10.1111/gcb.12597>
- MacLeod, C. D., Mandleberg, L., Schweder, C., Bannon, S. M., & Pierce, G. J. (2008). A comparison of approaches for modelling the occurrence of marine animals. *Hydrobiologia*, 612(1), 21–32. <https://doi.org/10.1007/s10750-008-9491-0>
- MADS. (2020). Comunicado de la República de Colombia sobre la 95° Reunión Anual de la Comisión Interamericana del Atún Tropical (CIAT). *Comunicado de Prensa*.
- Manel, S., Williams, H. C., & Ormerod, S. . (2001). Evaluating presence – absence models in ecology : the need to account for prevalence. *Journal of Applied Ecology*, 38, 921–931. <https://doi.org/10.1080/09613210110101185>
- Martínez-Ortiz, J., Aires-Da-silva, A. M., Lennert-Cody, C. E., & Maunder, M. N. (2015). The ecuadorian artisanal fishery for large pelagics: Species composition and spatio-temporal dynamics. *PLoS ONE*, 10(8), 1–29. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135136>
- Massutí, Enric & Morales-Nim, B. (1997). Reproductive biology of dolphin-fish (*Coryphaena hippurus* L.) off the island of Majorca (western Mediterranean). *Science*, 30, 57–65.
- Matsumoto, W., Skillman, R., & Dizon, A. (1984). Synopsis of biological data on skipjack

- tuna, *Katsuwonus pelamis*. *FAO Fisheries Synopsis*, (January 1984), 92.
- Melo-Merino, S. M., Reyes-Bonilla, H., & Lira-Noriega, A. (2020). Ecological niche models and species distribution models in marine environments: A literature review and spatial analysis of evidence. *Ecological Modelling*, 415(September 2019). <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2019.108837>
- Miller, F. R. (1984). Anomalías de la temperatura superficial del mar en el Océano Pacífico Oriental tropical y algunas consecuencias que se pueden presentar en la pesca de atún durante el Niño de 1982-1983. *Revista de La Comisión Permanente Del Pacífico Sur*, (15), 67–83.
- Miyake, M., Guillotreau, P., Sun, C.-H., & Ishimura, G. (2010). Recent developments in the tuna industry: stocks, fisheries, management, processing, trade and markets. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper.*, 543, 125.
- Monk, J., Ierodiaconou, D., Versace, V. L., Bellgrove, A., Harvey, E., Rattray, A., ... Quinn, G. P. (2010). Habitat suitability for marine fishes using presence-only modelling and multibeam sonar. *Marine Ecology Progress Series*, 420, 157–174. <https://doi.org/10.3354/meps08858>
- Moreno, G., Dagorn, L., Capello, M., Lopez, J., Filmlalter, J., Forget, F., ... Holland, K. (2016). Fish aggregating devices (FADs) as scientific platforms. *Fisheries Research*, 178, 122–129. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2015.09.021>
- Mourato, B., Hazin, H., Wor, C., Travassos, P., Arfelli, C., Amorim, A., & Hazin, F. (2010). Environmental and spatial effects on the size distribution of sailfish in the Atlantic ocean. *Ciencias Marinas*, 36(3), 225–236. <https://doi.org/10.7773/cm.v36i3.1735>
- Mugo, R. M., Saitoh, S.-I., Takahashi, F., Nihira, A., & Kuroyama, T. (2014). Evaluating the role of fronts in habitat overlaps between cold and warm water species in the western North Pacific: A proof of concept. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 107, 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2013.11.005>
- Muhling, B. A., Liu, Y., Lee, S. K., Lamkin, J. T., Roffer, M. A., Muller-Karger, F., & Walter, J. F. (2015). Potential impact of climate change on the Intra-Americas Sea: Part 2. Implications for Atlantic bluefin tuna and skipjack tuna adult and larval habitats. *Journal of Marine Systems*, 148, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2015.01.010>
- Nieblas, A. E., Demarcq, H., Drushka, K., Sloyan, B., & Bonhommeau, S. (2014). Front variability and surface ocean features of the presumed southern bluefin tuna spawning grounds in the tropical southeast Indian Ocean. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 107, 64–76. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2013.11.007>
- Nuridin, S., Mustapha, M. A., Lihan, T., & Zainuddin, M. (2017). Applicability of remote sensing oceanographic data in the detection of potential fishing grounds of *Rastrelliger kanagurta* in the archipelagic waters of Spermonde, Indonesia. *Fisheries Research*, 196(August 2016), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2017.07.029>
- ODS. (2019). Ocean Data Standards. Retrieved October 28, 2019, from The Ocean Data Standards and Best Practices Project (ODSBP) website: <http://www.oceandatastandards.org/>

- Olson, R. J., Young, J. W., Ménard, F., Potier, M., Allain, V., Goñi, N., ... Galván-Magaña, F. (2016). Bioenergetics, Trophic Ecology, and Niche Separation of Tunas. In *Advances in marine biology. Volume 35* (Vol. 74, pp. 199–344).  
<https://doi.org/10.1016/bs.amb.2016.06.002>
- Orue, B., Lopez, J., Moreno, G., Santiago, J., Soto, M., & Murua, H. (2019). Aggregation process of drifting fish aggregating devices (DFADs) in the Western Indian Ocean: Who arrives first, tuna or non-tuna species? *PLoS ONE*, *14*(1).  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0210435>
- Osorio, A. F. A., Peláez-Zapata, D. S., Guerrero-Gallego, J., Álvarez-Silva, O., Osorio-Cano, J. D., Toro, F. M., & Giraldo, A. (2014). Hidrodinámica aplicada a la gestión y la conservación de ecosistemas marinos y costeros: Isla Gorgona, Océano Pacífico Colombiano. *Revista de Biología Tropical*, *62*(February), 133–147.  
<https://doi.org/10.15517/rbt.v62i0.15983>
- Oxenford, H. A. (1999). Biology of the dolphinfish in the western central Atlantic: a review. *Scientia Marina*, *63*, 277–301.
- Oxenford, W., & Hunte, H. . (1983). Age and growth of dolphin, *Coryphaena hippurus*, as determined by growth rings in otoliths. *Fishery Bulletin*, *81*(4), 906–909.
- Pak, H., & Zaneveld, J. (1974). Equatorial front in the eastern Pacific Ocean. *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 4, pp. 570–578.
- Palacios, D. M., Herrera, J. C., Gerrodette, T., García, C., Soler, G. A., Avila, I. C., ... Kerr, I. (2012). Cetacean distribution and relative abundance in Colombia's Pacific EEZ from survey cruises and platforms of opportunity. *Journal of Cetacean Research and Management*, *12*(2), 45–60.
- Palko, B. J., Beardsley, G. L., & Richards, W. J. (1982). *Synopsis of the Biological data on dolphinfishes, Coryphaena hippurus and Coryphaena equiselis*.
- Pennington, J. T., Mahoney, K. L., Kuwahara, V. S., Kolber, D. D., Calienes, R., & Chavez, F. P. (2006). Primary production in the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, *69*(2–4), 285–317.  
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.012>
- Pitcher, T. J., & Cheung, W. W. L. (2013). Fisheries: Hope or despair? *Marine Pollution Bulletin*, *74*(2), 506–516. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.05.045>
- Portilla, J., Caicedo, A. L., Padilla-Hernández, R., & Cavaleri, L. (2015). Spectral wave conditions in the Colombian Pacific Ocean. *Ocean Modelling*, *92*, 149–168.  
<https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2015.06.005>
- Pörtner, H. O., & Knust, R. (2007). Climate change affects marine fishes through the oxygen limitation of thermal tolerance. *Science*, *315*(5808), 95–97.  
<https://doi.org/10.1126/science.1135471>
- Quinteros-Malpartida, S., & Ñiquen-Carranza, M. (2016). Plan de acción nacional para la conservación y manejo del recurso perico (*Coryphaena hippurus*) en el Perú (PAN PERICO - PERÚ). *Resolución Viceministerial 81-2016-PRODUCE/DVPA*, p. 41. Lima, Perú.

- Racault, M.-F., Sathyendranath, S., Brewin, R. J. W., Raitsos, D. E., Jackson, T., & Platt, T. (2017). Impact of El Niño Variability on Oceanic Phytoplankton. *Frontiers in Marine Science*, 4(May), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00133>
- Reagan, J., Boyer, T., Antonov, J., & Zweng, M. (2014). Comparison analysis between Aquarius sea surface salinity and World Ocean Database in situ analyzed sea surface salinity. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(11), 8122–8140. <https://doi.org/10.1002/2014JC009961>
- Restrepo Ángel, J. D. (2008). *Deltas de Colombia: morfodinámica y vulnerabilidad ante el cambio global*.
- Restrepo, J. D., & Cantera, J. R. (2013). Discharge diversion in the Patía River delta, the Colombian Pacific: Geomorphic and ecological consequences for mangrove ecosystems. *Journal of South American Earth Sciences*, 46, 183–198. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.04.006>
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., ... Rafaj, P. (2011). RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, 109(1–2), 33–57. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>
- Richardson, D. E., Llopiz, J. K., Leaman, K. D., Vertes, P. S., Muller-Karger, F. E., & Cowen, R. K. (2009). Sailfish (*Istiophorus platypterus*) spawning and larval environment in a Florida Current frontal eddy. *Progress in Oceanography*, 82(4), 252–264. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.003>
- Rodríguez-Roda, J. (1983). Edad y crecimiento de la melva, *Auxis rochei* (Risso), del sur de España. *Inv. Pesq.*, 47(3), 397–402.
- Rodríguez-Rubio, E., Schneider, W., & Abarca del Río, R. (2003). On the seasonal circulation within the Panama Bight derived from satellite observations of wind, altimetry and sea surface temperature. *Geophysical Research Letters*, 30(7), 0–3. <https://doi.org/10.1029/2002GL016794>
- Rodríguez Rubio, E., & Giraldo, A. (2011). Características oceanográficas en la Isla Malpelo y su relación con la cuenca oceánica del Pacífico colombiano. *Bulletin of Marine and Coastal Research*, 40, 19–32. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2011.40.0.126>
- Rueda, M., Doncel, O., Vilorio, E., Mármol, D., García, C., Girón, A., ... Barreto, C. (2011). Atlas de la pesca marino-costera de Colombia: 2010-2011. Tomo Pacífico. In *Serie de publicaciones especiales del INVEMAR*. Santa Marta: INVEMAR y ANH.
- Sakamoto, R., & Kojima, S. (1999). Review of dolphinfish biological and fishing data in Japanese waters. *Scientia Marina*, 63(3–4), 375–385. <https://doi.org/10.3989/scimar.1999.63n3-4375>
- Sánchez-Carnero, N., Rodríguez-Pérez, D., Couñago, E., Le Barzik, F., & Freire, J. (2016). Species distribution models and local ecological knowledge in marine protected areas: The case of Os Miñarzos (Spain). *Ocean and Coastal Management*, 124, 66–77. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.02.008>
- Schaefer, K. M., Fuller, D. W., & Block, B. A. (2011). Movements, behavior, and habitat

- utilization of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the Pacific Ocean off Baja California, Mexico, determined from archival tag data analyses, including unscented Kalman filtering. *Fisheries Research*, 112(1–2), 22–37.  
<https://doi.org/10.1016/j.fishres.2011.08.006>
- Schaefer, M. B., Broadhead, G. C., & Orange, C. J. (1963). Synopsis on the biology of yellowfin tuna *Thunnus* (*Neothunnus*) *albacares* (Bonnaterre) 1788 (Pacific Ocean). *FAO Fisheries Biology Synopsis*, 59(16), 538–561.
- Schlitzer, R. (2018). Ocean Data View. Retrieved March 5, 2019, from <https://odv.awi.de>
- Scott Fishery Consultants. (2014). *The use of FADs in tuna fisheries* (p. 70). p. 70. European Union: European Parliament's Committee on Fisheries.
- Seidov, D., Mishonov, A., Reagan, J., & Parsons, R. (2019). Resilience of the Gulf Stream path on decadal and longer timescales. *Scientific Reports*, 9(1), 1–9.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-48011-9>
- Selvaraj, J. J., Guzmán, Á. I., Rueda, M. E., Sepúlveda, P., Ramírez, A., & Aguirre, A. (2011). *Identificación y evaluación de nuevas áreas de pesca para grandes pelágicos en el pacífico colombiano* (p. 77). p. 77. Palmira.
- Sharp, G. D. (2001). Tuna oceanography-an applied science. *Fish Physiology*, 19(C), 345–389. [https://doi.org/10.1016/S1546-5098\(01\)19010-2](https://doi.org/10.1016/S1546-5098(01)19010-2)
- Shrestha, U. B., Sharma, K. P., Devkota, A., Siwakoti, M., & Shrestha, B. B. (2018). Potential impact of climate change on the distribution of six invasive alien plants in Nepal. *Ecological Indicators*, 95(May), 99–107.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.07.009>
- Silva, C., Andrade, I., Yáñez, E., Hormazabal, S., Barbieri, M. Á., Aranís, A., & Böhm, G. (2016). Predicting habitat suitability and geographic distribution of anchovy (*Engraulis ringens*) due to climate change in the coastal areas off Chile. *Progress in Oceanography*, 146, 159–174. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2016.06.006>
- Song, L., & Zhou, Y. (2010). Developing an integrated habitat index for bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the Indian Ocean based on longline fisheries data. *Fisheries Research*, 105(2), 63–74. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2010.03.004>
- Speers, A. E., Besedin, E. Y., Palardy, J. E., & Moore, C. (2016). Impacts of climate change and ocean acidification on coral reef fisheries: An integrated ecological-economic model. *Ecological Economics*, 128, 33–43.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.04.012>
- Strychar, K. B., & Sammarco, P. W. (2009). Exaptation in corals to high seawater temperatures: Low concentrations of apoptotic and necrotic cells in host coral tissue under bleaching conditions. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 369(1), 31–42. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2008.10.021>
- Suárez-Sánchez, J., Ritter-Ortiz, W., Gay-García, C., & Torres-Jácome, J. (2004). ENSO-tuna relations in the eastern Pacific Ocean and its prediction as a non-linear dynamic system. *Atmósfera*, 245–258.

- Sun, C. H., Chiang, F. S., Tsoa, E., & Chen, M. H. (2006). The effects of El Niño on the mackerel purse-seine fishery harvests in Taiwan: An analysis integrating the barometric readings and sea surface temperature. *Ecological Economics*, 56(2), 268–279. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.02.001>
- Svedrup, H. U., Johnson, M. W., & Fleming, R. H. (1942). *The Oceans Their Physics, Chemistry, and General Biology*. New York: Prentice-Hall, Inc.
- Svendsen, M. B. S., Domenici, P., Marras, S., Krause, J., Boswell, K. M., Rodriguez-Pinto, I., ... Steffensen, J. F. (2016). Maximum swimming speeds of sailfish and three other large marine predatory fish species based on muscle contraction time and stride length: A myth revisited. *Biology Open*, 5(10), 1415–1419. <https://doi.org/10.1242/bio.019919>
- Tang, H., Xu, L., Zhou, C., Wang, X., Zhu, G., & Hu, F. (2017). The effect of environmental variables, gear design and operational parameters on sinking performance of tuna purse seine setting on free-swimming schools. *Fisheries Research*, 196, 151–159. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2017.08.006>
- Teo, S. L. H., Boustany, A. M., & Block, B. A. (2007). Oceanographic preferences of Atlantic bluefin tuna, *Thunnus thynnus*, on their Gulf of Mexico breeding grounds. *Marine Biology*, 152(5), 1105–1119. <https://doi.org/10.1007/s00227-007-0758-1>
- Thuiller, W., Lafourcade, B., & Araujo, M. (2012). *The Presentation Manual for BIOMOD* (p. 35). p. 35.
- Tolotti, M. T., Forget, F., Capello, M., Filmlalter, J. D., Hutchinson, M., Itano, D., ... Dagorn, L. (2020). Association dynamics of tuna and purse seine bycatch species with drifting fish aggregating devices (FADs) in the tropical eastern Atlantic Ocean. *Fisheries Research*, 226(June 2019), 105521. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2020.105521>
- Toyoda, T., Fujii, Y., Kuragano, T., Matthews, J. P., Abe, H., Ebuchi, N., ... Kamachi, M. (2015). *Improvements to a global ocean data assimilation system through the incorporation of Aquarius surface salinity data*. (October), 2750–2759. <https://doi.org/10.1002/qj.2561>
- Tyberghein, L., Verbruggen, H., Pauly, K., Troupin, C., Mineur, F., De Clerck, O., ... De Clerck, O. (2012). Bio-ORACLE: a global environmental dataset for marine species distribution modelling. *Global Ecology and Biogeography*, 21(2), 272–281. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2011.00656.x>
- Valeiras, J., & Abad, E. (2006). Manual de ICCAT. Capítulo 2.1.10.2: MELVERA. *Manual de ICCAT*, pp. 1–20. Comisión Internacional para la Conservación del Atún del Atlántico.
- Valencia, B., & Giraldo, A. (2012). Structure of hyperiid amphipod assemblages on Isla Gorgona, eastern tropical Pacific off Colombia. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 92(7), 1489–1499. <https://doi.org/10.1017/S0025315411001780>
- van Haren, H. (2018). Grand Challenges in Physical Oceanography. *Frontiers in Marine Science*, 5(OCT), 1–3. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00404>

- van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., ... Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109(1), 5–31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Varela, J. L., Intriago, K. M., Flores, J. C., & Lucas-Pilozo, C. R. (2017). Feeding habits of juvenile yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in Ecuadorian waters assessed from stomach content and stable isotope analysis. *Fisheries Research*, 194(June), 89–98. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2017.05.017>
- Verneil, A., Franks, P. J. S., & Ohman, M. D. (2019). Frontogenesis and the Creation of Fine-Scale Vertical Phytoplankton Structure. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(3), 1509–1523. <https://doi.org/10.1029/2018JC014645>
- Wall, C. C., Muller-Karger, F. E., Roffer, M. A., Hu, C., Yao, W., & Luther, M. E. (2008). Satellite remote sensing of surface oceanic fronts in coastal waters off west-central Florida. *Remote Sensing of Environment*, 112(6), 2963–2976. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.02.007>
- Walter, V., & Fierstine, H. L. (1964). Measurements of Swimming Speeds of Yellowfin Tuna and Wahoo. *Nature*, 202(4928), 208–209. <https://doi.org/10.1038/202208b0>
- Wang, C., & Fiedler, P. C. (2006). ENSO variability and the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69(2–4), 239–266. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.004>
- Watts, M. J., Li, Y., Russell, B. D., Mellin, C., Connell, S. D., & Fordham, D. A. (2011). A novel method for mapping reefs and subtidal rocky habitats using artificial neural networks. *Ecological Modelling*, 222(15), 2606–2614. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.04.024>
- Weller, R. A., Baker, D. J., Glackin, M. M., Roberts, S. J., Schmitt, R. W., Twigg, E. S., & Vimont, D. J. (2019). The Challenge of Sustaining Ocean Observations. *Frontiers in Marine Science*, 6(MAR), 1–18. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00105>
- Whoriskey, S., Arauz, R., & Baum, J. K. (2011). Potential impacts of emerging mahi-mahi fisheries on sea turtle and elasmobranch bycatch species. *Biological Conservation*, 144(6), 1841–1849. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.03.021>
- Xie, S.-P., Xu, H., Kessler, W. S., & Nonaka, M. (2005). Air–Sea Interaction over the Eastern Pacific Warm Pool: Gap Winds, Thermocline Dome, and Atmospheric Convection\*. *Journal of Climate*, 18(1), 5–20. <https://doi.org/10.1175/JCLI-3249.1>
- Yan, Y., Li, Y., Wang, W. J., He, J. S., Yang, R. H., Wu, H. J., ... Yao, Y. J. (2017). Range shifts in response to climate change of *Ophiocordyceps sinensis*, a fungus endemic to the Tibetan Plateau. *Biological Conservation*, 206, 143–150. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.12.023>
- Yen, K.-W., Wang, G., & Lu, H.-J. (2017). Evaluating habitat suitability and relative abundance of skipjack ( *Katsuwonus pelamis* ) in the Western and Central Pacific during various El Niño events. *Ocean & Coastal Management*, 139, 153–160. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.02.011>
- Zainuddin, M. (2011). Skipjack Tuna in Relation To Sea Surface Temperature and

- Chlorophyll-a Concentration of Bone Bay Using Remotely Sensed Satellite Data. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*, 3(1).  
<https://doi.org/10.28930/jitkt.v3i1.7837>
- Zainuddin, M., Farhum, A., Safruddin, S., Selamat, M. B., Sudirman, S., Nurdin, N., ... Saitoh, S.-I. (2017). Detection of pelagic habitat hotspots for skipjack tuna in the Gulf of Bone-Flores Sea, southwestern Coral Triangle tuna, Indonesia. *PLOS ONE*, 12(10), e0185601. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185601>
- Zeidberg, L. D., & Robison, B. H. (2007). *Invasive range expansion by the Humboldt squid, Dosidicus gigas, in the eastern North Pacific. 2007.*
- Zellmer, A. J., Burdick, H., Medel, I., Pondella, D. J., & Ford, T. (2018). Aerial surveys and distribution models enable monitoring of fishing in Marine Protected Areas. *Ocean and Coastal Management*, 165(September), 298–306.  
<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.08.027>
- Zhang, Z., Xu, S., Capinha, C., Weterings, R., & Gao, T. (2019). Using species distribution model to predict the impact of climate change on the potential distribution of Japanese whiting *Sillago japonica*. *Ecological Indicators*, 104(December 2018), 333–340. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.05.023>
- Zhou, C., Xu, L., Hu, F., & Kumazawa, T. (2015). The kinetic deformation of tuna purse seine: A model experiment on different shooting patterns at uniform current. *Fisheries Research*, 169, 18–25. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2015.04.008>
- Zúñiga Flores, M. S., Ortega-García, S., & Klett-Traulsen, A. (2008). Interannual and seasonal variation of dolphinfish (*Coryphaena hippurus*) catch rates in the southern Gulf of California, Mexico. *Fisheries Research*, 94(1), 13–17.  
<https://doi.org/10.1016/j.fishres.2008.06.003>