

COMISIÓN INTERAMERICANA DEL ATÚN TROPICAL
2º TALLER SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO

La Jolla, California (EE. UU.)
24-26 de febrero de 2025
(por videoconferencia)

DOCUMENTO CC-02-01

**HERRAMIENTAS A CONSIDERAR POR EL PLAN DEL TRABAJO DE CAMBIO CLIMATICO DE LA
CIAT PARA LOGRAR PESQUERÍAS RESILIENTES AL CAMBIO CLIMATICO**

Dan Crear, Jon Lopez, Alexandre Aires-da-Silva, Jean-François Pulvenis de Séligny and Brad Wiley

ÍNDICE

Resumen	1
1. Antecedentes	2
2. Herramientas relacionadas con el clima: herramientas estratégicas vs. tácticas	3
3. Herramientas estratégicas	4
3.1 Datos oceanográficos y climáticos	4
3.2 Modelos de distribución de especies	5
3.3 Fisiología/experimentos de laboratorio	6
3.4 Indicadores.....	7
3.5 Evaluación de vulnerabilidad climática.....	8
3.6 Planificación de escenarios de cambio climático	11
3.7 Modelos de ecosistema	12
3.8 Evaluaciones de poblaciones basadas en información climática	13
3.9 Evaluación de estrategias de ordenación	16
3.10 Encuestas pesqueras.....	17
3.11 Encuestas de gestión	18
4. Recomendaciones preliminares del personal.....	19
5. Tablas	20
6. Figuras.....	23
7. Referencias	28

RESUMEN

El cambio climático está afectando de manera creciente a las especies marinas, los ecosistemas y las comunidades pesqueras, lo que llevó a la Comisión Interamericana del Atún Tropical (CIAT) a adoptar una Resolución sobre el Cambio Climático ([C-24-10](#)) y a desarrollar un marco de trabajo para pesquerías resilientes al Clima para el Océano Pacífico oriental (OPO). Como parte de este marco de trabajo, el siguiente paso fundamental consiste en evaluar los impactos y vulnerabilidades climáticas a tres niveles: ecológico/ecosistémico, pesquero y de gestión, a través de herramientas estratégicas (orientadas a la ciencia). Este documento revisa las herramientas estratégicas disponibles para llevar a cabo dicha evaluación, basándose en ejemplos exitosos de otras regiones y organizaciones, y presenta recomendaciones preliminares del personal como punto de partida para la discusión en el 2º Taller sobre

Cambio Climático de la CIAT. Las herramientas estratégicas revisadas abarcan un amplio espectro, desde los **modelos de distribución de especies** que predicen cómo las especies objetivo y de captura incidental podrían desplazar sus áreas de distribución en respuesta a las cambiantes condiciones oceánicas, hasta la **planificación de escenarios**, que involucra a las diversas partes interesadas para prepararse ante una serie de futuros posibles, ayudando a los gestores a desarrollar respuestas proactivas de gobernanza y monitoreo. Los **productos de datos oceanográficos y climáticos** monitorean variables ambientales en el espacio y el tiempo y apoyan muchas de las herramientas descritas en esta revisión. Las **evaluaciones de vulnerabilidad climática (EVC)** clasifican sistemáticamente las especies, pesquerías y comunidades pesqueras según su exposición y sensibilidad al cambio climático, y se han aplicado a nivel mundial, desde Estados Unidos y Canadá hasta el Mediterráneo y las islas del Pacífico. Las **evaluaciones de poblaciones informadas por el clima** y las **evaluaciones de estrategias de ordenación (EEO)** integran directamente variables ambientales en los modelos de población y las estrategias de explotación, para evaluar qué tan robustas son las medidas de gestión actuales frente a las condiciones climáticas futuras. Por último, las **encuestas pesqueras y de gestión** brindan información directa sobre cómo los pescadores y gestores perciben los riesgos climáticos y la capacidad de adaptación disponible. Con base en esta revisión, el personal recomienda priorizar en el corto plazo los datos oceanográficos, los MDE, las EVC, la planificación de escenarios, las encuestas pesqueras y las encuestas de gestión, mientras que las evaluaciones de poblaciones informadas por el clima y las EEO deberán desarrollarse a medida que los datos de base y los modelos vayan madurando (cabe señalar que muchas de estas herramientas ya están siendo desarrolladas por el personal de la CIAT). Los resultados de las discusiones del taller se utilizarán para perfeccionar estas recomendaciones y presentarlas al Grupo de Trabajo sobre Ecosistema y Captura Incidental (GTECI), al Comité Científico Asesor (CCA) y a la Comisión más adelante en 2026. En un documento futuro adicional se abordarán en detalle las herramientas tácticas (orientadas a la gestión), tema que está programado para discutirse en un taller posterior.

1. ANTECEDENTES

En 2023, la CIAT adoptó la [Resolución C-23-10](#) sobre cambio climático, como resultado de los impactos directos e indirectos del cambio climático y la evolución del entorno sobre las especies marinas, los ecosistemas y las comunidades pesqueras. Como consecuencia de esta resolución y de las enmiendas posteriores ([Resolución C-24-10](#)), el personal desarrolló un plan de trabajo sobre cambio climático para promover pesquerías atuneras resilientes al clima en el Océano Pacífico oriental (OPO) ([SAC-15-12](#)), en el entendido de que los detalles del plan de trabajo y su implementación serían elaborados en consulta, según corresponda, con todas las partes interesadas pertinentes. El plan de trabajo, que fue bien recibido y apoyado durante la 2ª reunión del GTECI, así como en la 15ª reunión del Comité Científico Asesor (CCA; [Recomendaciones de SAC-15](#)), consta de cinco fases: 1) Planificación, 2) Definición de objetivo y alcance, 3) Desarrollo de un marco, 4) Creación de herramientas, y 5) Aplicación de herramientas y/o implementación de la gestión. La Fase 1 se completó a mediados de 2024 y, en febrero de 2025, el personal organizó un taller virtual de tres días para discutir las Fases 2 y 3. El 1º Taller sobre Cambio Climático de la CIAT, en el que participaron más de 70 participantes, incluyendo, entre otros, representantes de las CPC, ONG y academia, se centró en la importancia de definir claramente el objetivo, el alcance y el marco para los planes de trabajo sobre cambio climático, y específicamente cuál debería ser el objetivo, el alcance y el marco en la CIAT. A partir de este exitoso taller, el personal elaboró recomendaciones para definir el objetivo, el alcance y el marco del plan de trabajo sobre cambio climático de la CIAT ([SAC-16 INF-P](#)). Estas recomendaciones fueron plenamente respaldadas por el 3º GTECI, así como por la 16ª reunión del CCA en junio de 2025 ([Recomendaciones de SAC-16](#)).

Con la finalización de las Fases 2 y 3 en 2025, en 2026 el personal planea avanzar a la Fase 4: creación de herramientas. Al igual que muchos otros marcos pesqueros relacionados con el clima (por ejemplo,

Manual de Adaptación al Cambio Climático: Fulton et al. 2020; Marco de Adaptación al Cambio Climático para Pesquerías: Boyce et al. 2023), el Marco de Pesquerías Resilientes al Clima de la CIAT (Figura 1) consta de múltiples pasos, muchos de los cuales requieren varios tipos de herramientas. Tras la finalización del Paso 1 del marco, *definir el objetivo y el alcance*, la CIAT pasa al Paso 2, que consiste en *evaluar los impactos y vulnerabilidades climáticas*. Al igual que en otros marcos de cambio climático relacionados con pesquerías, es importante no solo evaluar los impactos y vulnerabilidades del cambio climático y ambiental a nivel de especies y ecosistemas, sino también a nivel pesquero y de gestión. Los tres niveles están representados en el Paso 2 del marco propuesto como un pequeño círculo conectado en el que se realiza una evaluación de cada nivel para comprender plenamente el impacto climático, las vulnerabilidades, el riesgo y las barreras. El personal planea trabajar con las partes interesadas para crear conjuntamente diversas herramientas que ayuden a la Comisión a comprender y prepararse mejor para los impactos climáticos en los tres niveles. Dado que esta puede ser una tarea importante con numerosos proyectos de investigación y una combinación de herramientas, es probable que la Fase 4 del plan de trabajo (y el Paso 2 del marco) tome considerablemente más tiempo en completarse en comparación con las tres fases anteriores.

El propósito de este documento es describir las diversas herramientas relacionadas con el clima que existen y que podrían considerarse para lograr el Paso 2 (evaluar los impactos y vulnerabilidades climáticas) del marco, a partir de herramientas exitosas desarrolladas por otros grupos o iniciativas. Además, este documento contiene un conjunto de recomendaciones preliminares del personal de la CIAT sobre las herramientas, como punto de partida y referencia para fomentar y facilitar la discusión entre los miembros y las partes interesadas pertinentes en el 2º Taller sobre Cambio Climático. Asimismo, este documento revisa las herramientas actuales que el personal de la CIAT ya ha desarrollado y tiene disponibles, y que podrían contribuir al Paso 2 (evaluar los impactos y vulnerabilidades climáticas). Los resultados de esta discusión informal entre los participantes del taller se utilizarán para revisar las recomendaciones preliminares del personal y orientar el desarrollo de las herramientas; las actualizaciones correspondientes serán presentadas al GTECI, al CCA y posteriormente a la Comisión, en las reuniones anuales de 2026.

2. HERRAMIENTAS RELACIONADAS CON EL CLIMA: HERRAMIENTAS ESTRATÉGICAS VS. TÁCTICAS

Las herramientas relacionadas con el clima son instrumentos estratégicos o tácticos diseñados para apoyar las decisiones y acciones de gestión pesquera. Son particularmente importantes porque se utilizan para ayudar a los científicos a monitorear los cambios, así como para asistir a los gestores de recursos en la implementación de medidas para hacer frente a dichos cambios. Concretamente, una **herramienta estratégica** es un *instrumento científico* utilizado para apoyar la gestión y abordar *qué* harán los científicos para evaluar, monitorear y seguir el desempeño y/o el estado de una preocupación/elemento de interés específico. Una **herramienta táctica**, en cambio, es un *instrumento operativo* utilizado para apoyar la gestión y abordar *cómo* los gestores de recursos implementarán las medidas de gestión para una preocupación/elemento de interés específico. En la práctica, la aplicación de estas herramientas es a menudo iterativa y colaborativa, con científicos y gestores de recursos trabajando conjuntamente para perfeccionar las evaluaciones y ajustar las acciones de gestión a medida que nueva información se vuelve disponible. Además, algunas herramientas pueden tener un doble propósito, funcionando tanto como instrumentos estratégicos como tácticos según el contexto en el que se apliquen. Muchas de estas herramientas han sido desarrolladas por otros países y organizaciones y pueden adaptarse para la CIAT. Dado que las herramientas estratégicas serán necesarias para lograr el Paso 2 (evaluar los impactos y vulnerabilidades climáticas) del marco, a continuación se describen en detalle las diversas herramientas estratégicas existentes que han sido desarrolladas con éxito, junto con el nivel (**ecológico/ecosistémico, pesquero, de gestión**) al que cada herramienta estratégica es más apropiada para evaluar los impactos y

vulnerabilidades climáticas. Un ejercicio similar se llevará a cabo en el futuro cercano para las herramientas tácticas (instrumentos orientados a la gestión) en un taller dedicado y con el material asociado.

3. HERRAMIENTAS ESTRATÉGICAS

3.1 DATOS OCEANOGRÁFICOS Y CLIMÁTICOS

Los datos oceanográficos se recopilan frecuentemente mediante mediciones *in situ* (por ejemplo, mediciones de buques y boyas) y teledetección. Usando esta información, los oceanógrafos pueden asimilar datos y modelar y predecir ciertas variables oceanográficas en diversas escalas espaciales y temporales. Los avances recientes en capacidad computacional han llevado a obtener información con mayor resolución espacial y temporal en el océano. Las áreas donde los datos se recopilan, asimilan y modelan con mayor resolución espacial y temporal a menudo pueden generar predicciones ambientales a escalas espaciales y temporales más finas. Estos tipos de datos son herramientas que pueden utilizarse para comprender cómo el cambio climático y ambiental impacta a diversas entidades a los **niveles ecosistémico/ecológico y pesquero**.

Puede producirse una amplia variedad de variables ambientales que van desde estáticas (no cambian con el tiempo) hasta dinámicas (cambian con el tiempo), y desde la superficie hasta las capas subsuperficiales y el fondo. Las variables estáticas incluyen, por ejemplo, la batimetría (profundidad) y la rugosidad (es decir, la irregularidad del fondo, que puede derivarse de la batimetría). Las variables dinámicas de la superficie más comunes incluyen, por ejemplo, la temperatura de la superficie del mar (TSM), la salinidad superficial del mar, la altura de la superficie del mar (altimetría), la velocidad y dirección de las corrientes superficiales, el estrés del viento superficial y la rotación (medida de la rotación del estrés del viento), la energía cinética de los remolinos (indicador de la variabilidad de mesoescala debida a los remolinos), la clorofila (a menudo indicadora de la producción primaria) y la turbidez. Pueden derivarse variables adicionales de las anteriores, como gradientes, intensidades, anomalías y desviación estándar de la TSM y la altura de la superficie del mar, que pueden ser indicadores de frentes. Algunas de las variables subsuperficiales incluyen la profundidad de la capa de mezcla y la temperatura, salinidad y velocidades de las corrientes del agua a distintos niveles de profundidad. Las variables subsuperficiales no están rápidamente disponibles y a menudo requieren procesamiento adicional de datos. Por último, donde se han desarrollado modelos biogeoquímicos, variables como el oxígeno disuelto y el nitrato están disponibles para regiones específicas; sin embargo, estos tipos de modelos tienen una resolución espaciotemporal muy alta y son típicamente disponibles en cuerpos de agua muy específicos y bien estudiados (por ejemplo, la Bahía de Chesapeake; Feng et al. 2015). Cada una de estas variables ha sido considerada al analizar los impactos ambientales y climáticos sobre el atún y especies afines, ya que afectan directamente la fisiología y el comportamiento de estas especies o influyen en sus presas (incluidos los buques pesqueros), afectando en última instancia sus distribuciones (Hazen et al. 2013, Dell'Apa et al. 2023). Muchas de las variables mencionadas están disponibles para varios períodos históricos y contemporáneos. A menudo, un subconjunto de esas variables puede proyectarse al futuro con base en proyecciones climáticas. Las proyecciones pueden ser a corto plazo, como días, semanas o meses en el futuro (denominadas frecuentemente pronósticos a corto plazo o estacionales), o a largo plazo, como múltiples décadas hasta finales de siglo (es decir, 2050, 2100). El período temporal de los datos pronosticados generalmente se basa en el objetivo y el alcance de su aplicación específica.

Existen numerosos productos de datos oceanográficos a nivel mundial, pero el período temporal y la resolución espacial varían considerablemente. Un producto comúnmente utilizado para datos oceanográficos contemporáneos es el Reanálisis Global de Física Oceánica (GLORYS, Servicio de Monitoreo del Entorno Marino de Copernicus; Lellouche et al. 2018), que consiste en un modelo oceánico global asimilador de datos, alimentado por mediciones *in situ* y teledetección, que produce salidas diarias

sin lagunas a una resolución horizontal de $1/12^\circ$ (~ 9 km) y 50 niveles verticales. Para las proyecciones climáticas, existen muchos modelos climáticos del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fases 5 (CMIP5) y 6 (CMIP6) (IPCC 2023) que proporcionan condiciones oceánicas para varios períodos temporales a una resolución horizontal de 1° . Por otro lado, el Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos (GFDL) de la NOAA desarrolló el CM2.6, que es un modelo climático global de alta resolución ($1/10^\circ$) que resuelve la circulación oceánica a lo largo de la plataforma continental de EE. UU. y proporciona cambios mensuales esperados (deltas) en las condiciones oceánicas a lo largo de un período de 80 años (Saba et al. 2016). Estos tipos de Modelos del Sistema Terrestre (ESM por sus siglas en inglés) integran diferentes componentes del sistema climático de la Tierra, como la atmósfera, los océanos y los ciclos biogeoquímicos. **Hasta la fecha, el personal de la CIAT ha descargado, procesado y utilizado muchas de las variables mencionadas anteriormente para el OPO desde 1995 hasta 2023, principalmente con resolución temporal diaria y resolución espacial de $1/4^\circ$ o $1/12^\circ$.**

Los productos de datos oceanográficos son frecuentemente la base de muchas herramientas de pesquerías resilientes al clima. Por ello, en las distintas secciones de herramientas a continuación, se destacarán las aplicaciones de los datos oceanográficos, ya que estos datos son fundamentales para determinar los efectos del cambio climático sobre las pesquerías.

3.2 MODELOS DE DISTRIBUCIÓN DE ESPECIES

Los modelos de distribución de especies (MDE), también llamados modelos de idoneidad de hábitat, se desarrollan para comprender las relaciones entre el entorno y una especie particular, así como para predecir la distribución de una especie en un espacio y período temporal determinados. Los datos de las especies se obtienen de fuentes dependientes de la pesca (por ejemplo, programas de observadores o cuadernos de bitácora) o de fuentes independientes de la pesca (por ejemplo, encuestas o datos de marcado) y consisten en información espacial (latitud y longitud) y fecha/hora. Para comprender la relación entre las condiciones ambientales y la ocurrencia o abundancia de una especie, los datos oceanográficos extraídos de un producto oceánico apropiado se vinculan a los datos de la especie según su ubicación y fecha, y se desarrolla un modelo para estimar las relaciones. Para predecir la distribución de una especie en un área determinada (por ejemplo, el OPO) y un período temporal (por ejemplo, julio de 2023), es necesario extraer los datos oceanográficos para la misma área y período temporal a partir de los productos oceánicos disponibles. En el contexto del cambio climático, los MDE se utilizan frecuentemente para examinar cómo las distribuciones pueden cambiar en respuesta a diversas condiciones oceánicas, convirtiéndolos en una herramienta ideal para comprender los impactos climáticos a **nivel ecosistémico/ecológico o de especies**. Los MDE de embarcaciones también se han utilizado para predecir dónde los pescadores pueden realizar lances dado un conjunto de condiciones oceánicas (por ejemplo, olas de calor marinas) (Farchadi et al. 2024, Welch et al. 2025).

Existen muchos tipos de MDE que se han utilizado para comprender los impactos del entorno y el cambio climático sobre la distribución de las especies marinas. Los MDE más comunes utilizan enfoques de modelado correlativo o de regresión. Esto incluye modelos semiparamétricos, como los modelos aditivos generalizados (GAM), y modelos de aprendizaje automático, como los bosques aleatorios o los árboles de regresión potenciados (BRT). Estos modelos suelen utilizar datos de presencia/ausencia de especies y producen probabilidades de ocurrencia. Por ejemplo, McHenry et al. (2019) utilizaron datos de arrastres de fondo independientes de la pesca y GAM para proyectar la probabilidad de ocurrencia y, por lo tanto, el cambio en la distribución bajo el cambio climático de 125 especies a lo largo de la plataforma nororiental de EE. UU., mientras que Braun et al. (2023) utilizaron datos dependientes de la pesca y BRT para proyectar los cambios en la distribución de la ocurrencia de 12 especies altamente migratorias en el Océano Atlántico Noroccidental y el Golfo de México bajo el cambio climático. Por último, Lezama-Ochoa et al. (2023) aplicaron MDE de 10 especies altamente migratorias en la Corriente de California para

proyectar desplazamientos direccionales y de distribución bajo diferentes escenarios de cambio climático. Los cambios en la distribución de la abundancia relativa también pueden determinarse utilizando modelos Delta-lognormal y de Espacio-Tiempo Vectorialmente Autorregresivo (VAST). Estos métodos pueden considerar datos de captura y asociaciones de hábitat para derivar abundancias relativas, lo que puede ser preferible para ciertas aplicaciones. Por ejemplo, el modelo delta-lognormal se utilizó junto con datos de encuestas ecológicas de largo plazo para proyectar los desplazamientos del hábitat térmico de 686 especies bajo el cambio climático a lo largo de la plataforma continental de América del Norte (Morley et al. 2018). Para las especies en las que el conjunto de datos es solo de presencia (por ejemplo, datos de marcado), se pueden crear pseudo-ausencias, aleatorizadas espacial y temporalmente, de modo que los resultados del modelo sean informativos. Por ejemplo, Champion et al. (2021) desarrollaron 10.000 pseudo-ausencias para acompañar los datos de presencia de una base de datos de marcado de peces de pesca deportiva y desarrollaron un GAM para proyectar los desplazamientos de distribución bajo el cambio climático de cuatro peces pelágicos costeros de importancia recreativa frente a la costa este de Australia. Cuando los datos climáticos contemporáneos y futuros están disponibles en toda la columna de agua y los datos ambientales se miden y archivan mientras las especies nadan libremente en la naturaleza, los cambios en la distribución de las especies pueden determinarse en un hábitat tridimensional. Por ejemplo, se desarrolló un MDE de integración de profundidad para la cobia (*Rachycentron canadum*) a partir de datos de marcado de archivo y modelos climáticos de alta resolución para evaluar los desplazamientos en su distribución a lo largo de la costa este de EE. UU. entre períodos de tiempo contemporáneos y futuros (Crear et al. 2020c).

El desarrollo de MDE ha sido una prioridad para el personal de la CIAT debido a su amplia aplicabilidad. Por ejemplo, además de utilizarse para predecir impactos ambientales y climáticos, los MDE pueden asistir en decisiones de gestión espacial (Crear et al. 2021), evaluaciones de vulnerabilidad (Griffiths et al. 2024) y herramientas de evitación de capturas incidentales (Hazen et al. 2018). La CIAT está desarrollando una biblioteca de MDE donde se generan MDE individuales por especie y se pueden aplicar a diversas aplicaciones mencionadas anteriormente. Hasta la fecha, el personal ha desarrollado inicialmente MDE para los atunes tropicales ([SAC-10 INF-D](#)) y para especies de captura incidental como las tortugas laúd, para comprender la idoneidad del hábitat de las especies y cómo puede desplazarse con los cambios ambientales como durante el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO; por sus siglas en inglés) (Figura 2; Lopez et al. 2024). Actualmente se están desarrollando MDE para los tiburones sedoso y oceánico de punta blanca, así como para el dorado y varias especies de peces de pico, por parte del personal de la CIAT y múltiples colaboradores para expandir la biblioteca de MDE de la CIAT.

Dado que los MDE se construyen sobre los datos oceanográficos, muchas otras herramientas de pesquerías resilientes al clima se basan en los resultados de los MDE. La integración de los MDE en otras herramientas se describe a continuación.

3.3 FISIOLÓGÍA/EXPERIMENTOS DE LABORATORIO

Una desventaja de los MDE basados en datos pesqueros o de marcado es que las relaciones determinadas entre la especie y el entorno se limitan a las condiciones que el animal experimentó. Esto dificulta identificar la respuesta de una especie a condiciones más extremas o novedosas. Además, existen etapas de vida de muchas especies que no son capturadas en pesquerías ni marcadas, lo que hace difícil comprender y predecir ciertos efectos ambientales. Realizar experimentos fisiológicos en el laboratorio es, por lo tanto, una herramienta que podría ayudar a abordar ambas brechas al identificar los impactos climáticos a **nivel ecológico**.

Pueden utilizarse varias métricas fisiológicas para determinar el efecto del entorno sobre las especies marinas, como la tasa metabólica, la tasa de actividad/velocidad de natación, la tasa de alimentación y la tasa de mortalidad. Por ejemplo, a través de respirometría, el metabolismo del tiburón de banco juvenil

(*Carcharhinus plumbeus*) medido en diferentes condiciones de temperatura y oxígeno permitió identificar el umbral máximo de temperatura y el umbral mínimo de oxígeno, es decir, las condiciones que la especie evita o no experimenta en la naturaleza (Crear et al. 2019). Estos tipos de relaciones se han traducido en MDE basados en fisiología (Slesinger et al. 2024) o MDE híbridos que combinan relaciones de campo y laboratorio (Crear et al. 2020b). Slesinger et al. (2024) calcularon un índice metabólico (es decir, un MDE basado en fisiología) a partir de parámetros fisiológicos específicos de la especie obtenidos en estudios de laboratorio, mapearon las áreas inadecuadas para las especies durante diferentes estaciones y estimaron la pérdida de hábitat bajo el aumento del CO₂ atmosférico. Las métricas fisiológicas y de comportamiento medidas en el laboratorio también se han utilizado para determinar la respuesta de las especies a la captura pesquera (Bouyoucos et al. 2017) y cómo las respuestas cambian bajo diferentes condiciones ambientales (Crear et al. 2020a).

Las etapas de vida más jóvenes son a menudo más influenciadas por el entorno en comparación con las etapas de vida más viejas. Los cambios durante los primeros estadios de vida pueden conducir a una fuerte variabilidad en el reclutamiento y, en última instancia, a cambios en la dinámica de la población, la distribución y la reproducción. Comprender estos procesos es fundamental para interpretar y predecir los cambios a nivel poblacional. Afortunadamente, la CIAT ya ha comenzado a priorizar estas relaciones como resultado del extenso trabajo que el Grupo de Historia de Vida Temprana ha estado desarrollando en el Laboratorio de Achotines de la CIAT durante tres décadas (Margulies et al. 2016). Entre las investigaciones desarrolladas en el Laboratorio de Achotines ([SAC-16 INF-L](#); [Buchalla et al. 2024](#)), el grupo ha investigado los efectos del cambio climático y ambiental (temperatura, oxígeno, CO₂) sobre el desarrollo de órganos, la morfología de los otolitos, el metabolismo, el comportamiento alimentario, el crecimiento y la supervivencia de los huevos y larvas de atún aleta amarilla, con el objetivo de comprender los factores que causan variabilidad en las poblaciones de atún y, así, apoyar las decisiones de gestión (Wexler et al. 2011, Bromhead et al. 2015, Frommel et al. 2016, Margulies et al. 2016, Heuer et al. 2020). Parte de este trabajo ya ha informado un modelo de biomasa de atún en el Pacífico (SEAPODYM, Nicol et al. 2022, véase la sección 3.8.2). Este trabajo está previsto que se amplíe a las etapas de vida juvenil y a más especies (por ejemplo, otras especies de atún y especies de captura incidental, sujeto a oportunidades de financiamiento). Los resultados de estos estudios se utilizarán para desarrollar una herramienta de predicción del reclutamiento, MDE basados en fisiología y otras herramientas estratégicas y tácticas.

3.4 INDICADORES

Los indicadores proporcionan un medio para monitorear los cambios a lo largo del tiempo y, en términos ideales, tienen umbrales asociados que, a su vez, pueden motivar una respuesta o acción por parte de los responsables de políticas. Se han desarrollado varios indicadores para datos climáticos/ambientales, como el Índice de Niño Oceánico (ONI) utilizado para monitorear los eventos ENSO o los cambios en la anomalía media de la TSM para un cuerpo de agua determinado. Se han creado indicadores ecológicos utilizando datos de captura y esfuerzo pesquero, modelos de ecosistema o resultados de MDE, entre otros. Algunos ejemplos de indicadores pesqueros incluyen las capturas relativas de una especie para una pesquería a lo largo del tiempo o las métricas relacionadas con la latitud de una especie capturada a través del tiempo. Los índices ecológicos (**nivel ecosistémico/ecológico**) pueden obtenerse de modelos de ecosistema (por ejemplo, Ecopath con Ecosim) e incluyen indicadores tróficos (por ejemplo, el nivel trófico medio de las capturas), índices de diversidad (por ejemplo, el índice de Shannon) e indicadores de equilibrio en la pesca (FIB) (véase, por ejemplo, [SAC-10-15](#)). Los indicadores socioeconómicos (**nivel pesquero**) como el precio o los ingresos de la pesca comercial también pueden considerarse y ayudar a determinar el enfoque sobre una especie específica, siempre que los datos, a menudo confidenciales y difíciles de obtener regularmente, estén disponibles. Una lista de indicadores calculados y presentados a las Comisiones respectivas o propuestos por los científicos que apoyan a las OROP atuneras se incluye en

la Tabla 2 del Documento [WGEB-02-02](#). Los cambios en muchos de estos indicadores podrían asociarse a los impactos del clima, lo que puede ayudar a monitorear y promover pesquerías preparadas para el cambio climático.

Una síntesis global de indicadores relacionados con el clima realizada en 65 estudios encontró 119 indicadores y cuantificó el tipo de información utilizada para desarrollarlos (por ejemplo, conocimiento local y de expertos frente a datos científicos), la escala espacial del indicador (por ejemplo, global frente a nacional) y si el indicador tenía un enfoque ecológico, socioeconómico o socioecológico (Li et al. 2023). Este estudio identificó que la brecha entre los países que cuentan con recursos e insumos disponibles y los que no los tienen es la que necesita más urgentemente herramientas de adaptación. A pesar de ello, los autores revelaron que ha habido un uso extensivo de indicadores en la gestión dinámica y la planificación de la adaptación tanto para contextos ecológicos como sociales. Los indicadores seguirán siendo útiles para las pesquerías resilientes al clima; sin embargo, es importante que los indicadores se elaboren en colaboración con los gestores y otras partes interesadas relevantes que coordinan la respuesta o acción ante el cambio. El personal de la CIAT ha reconocido la utilidad potencial de los indicadores para representar el estado del ecosistema. En consecuencia, se ha creado un plan de trabajo para desarrollar un informe-ficha del ecosistema basado en indicadores ("EcoCard") y una Evaluación del Estado del Ecosistema complementaria para el OPO, vinculándose con las partes interesadas (es decir, el GTECI de la CIAT, el CCA y la Comisión) y expertos globales ([WGEB-02-02](#)). Se espera que las discusiones sobre los detalles de los indicadores se lleven a cabo regularmente con el GTECI y el CCA, a medida que el plan de trabajo del EcoCard avance.

3.5 EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD CLIMÁTICA

Las Evaluaciones de Vulnerabilidad Climática (EVC) son una herramienta para identificar la vulnerabilidad relativa de una entidad u objetivo específico, ya sea una especie, el hábitat o el ecosistema, o la comunidad pesquera. La vulnerabilidad de una entidad específica, como una especie, es función de su exposición al cambio ambiental, su sensibilidad biológica a ese cambio dadas sus diversas características biológicas inherentes, y su capacidad adaptativa y resiliencia para hacer frente a dicho cambio (Williams et al. 2008, Johnson y Welch 2009, Hare et al. 2016). Las EVC están diseñadas para ser un enfoque rápido que puede informar a investigadores y gestores sobre dónde priorizar sus recursos y esfuerzos. El método para llevar a cabo una EVC ha tomado muchas formas y a menudo se les dan diferentes nombres (por ejemplo, Evaluación de Riesgo Climático), pero todos siguen el marco general cualitativo y/o semicuantitativo de exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa. A continuación se proporcionan ejemplos de EVC en los niveles **ecosistémico/ecológico** y **pesquero**.

3.5.1 Ecosistemas/ecológico

El método desarrollado por el Servicio Nacional de Pesquerías Marinas (NOAA Fisheries) de EE. UU. consta principalmente de dos componentes y se ha utilizado principalmente para evaluar la vulnerabilidad de las especies o stocks al cambio climático (Hare et al. 2016, McClure et al. 2023). El primer componente del proceso es una evaluación de las sensibilidades biológicas y la capacidad adaptativa de las especies (por ejemplo, movilidad de los adultos, reproducción, sensibilidad a la temperatura) basada en un panel de expertos científicos. El segundo componente es la exposición climática (por ejemplo, TSM, pH, niveles de oxígeno), definida como la cantidad de cambio a la que una especie puede estar expuesta durante un determinado período de tiempo. La puntuación de sensibilidad biológica cualitativa se combina con la puntuación de exposición cuantitativa para obtener una clasificación de vulnerabilidad general (por ejemplo, baja, moderada, alta o muy alta) que puede compararse entre especies. Hasta la fecha, se han realizado EVC siguiendo este método en muchas regiones alrededor de EE. UU., incluyendo el ecosistema marino grande (EML) de la plataforma nororiental (82 especies) (Hare et al. 2016), el Atlántico Sur (71 especies), el Golfo de México (75 especies), el Mar de Bering (36 especies) (Spencer et al. 2019), el EML

de la Corriente de California (64 especies) (McClure et al. 2023) y las islas del Pacífico (83 especies) (Giddens et al. 2022). También se han desarrollado EVC para grupos de especies específicos, como el salmón del Pacífico y el trucha de mar (33 stocks/unidades) (Crozier et al. 2019), las especies altamente migratorias (EAM) del Atlántico (58 especies/stocks) (Figura 3; Loughran et al. 2025), así como especies protegidas como los mamíferos marinos del Atlántico (108 especies) (Lettrich et al. 2023), los mamíferos marinos del Pacífico (en curso) y las tortugas marinas (en curso). Además de una clasificación general de vulnerabilidad para cada especie, el panel de expertos científicos proporciona puntuaciones cualitativas que describen el potencial de desplazamiento de distribución, el efecto direccional (positivo, negativo, neutral) del cambio climático y un valor de calidad de los datos. Se elabora una narrativa para cada especie que describe las puntuaciones específicas y las contextualiza con la historia de vida y el comportamiento de la especie. Estos resultados han informado documentos de la Ley de Especies en Peligro (ESA), evaluaciones de riesgos, ejercicios de planificación de escenarios y necesidades de investigación y datos. Dada la amplia aplicación de este método de EVC para especies específicas, otros grupos han completado EVC de estilo similar en diferentes partes del mundo, como en las Bahamas y Belice (Carroll et al. 2023) y en el Atlántico Nororiental (Kjesbu et al. 2022). Por último, este método de EVC también se ha adaptado para hábitats específicos. Farr et al. (2021) evaluaron la vulnerabilidad de 52 hábitats marinos, estuarinos y fluviales en el noreste de EE. UU. al cambio climático.

En el sureste de Australia se desarrolló un tipo diferente de EVC utilizando análisis multicriterio para cinco especies de peces pelágicos costeros. Champion et al. (2023) utilizaron literatura primaria, datos disponibles y conocimiento de expertos para establecer criterios que especificaban las preferencias de hábitat y condiciones ambientales de las especies, y luego utilizaron los mismos recursos para ponderar esas condiciones según su importancia para una especie. De manera similar a un MDE, esta información se utilizó para calcular el cambio en la idoneidad del hábitat y, por lo tanto, la vulnerabilidad, proyectada espacialmente entre dos períodos de tiempo. Una ventaja de este enfoque es que es espacialmente explícito y, por lo tanto, puede informar la gestión regional específica. Este método también puede aplicarse a especies con escasez de datos y cuya distribución no se conoce claramente, pero donde el conocimiento de expertos puede formar la base de la distribución de la especie.

En el Mar Mediterráneo, se desarrolló una versión diferente de EVC para diversas pesquerías, denominada evaluación del riesgo climático (ERC) (Pita et al. 2021). Este estudio se centró en alrededor de 100 especies que eran las más importantes para las pesquerías en el Mediterráneo y utilizó dos componentes, similares a las EVC de EE. UU. Los MDE se utilizaron para determinar la distribución de las especies y la exposición climática se calculó con base en el cambio en las variables ambientales entre dos períodos de tiempo. También se identificaron y puntuaron las sensibilidades biológicas basadas en rasgos. Las puntuaciones de exposición y sensibilidad se combinaron para obtener una puntuación de peligro para una especie (Figura 4a). Las puntuaciones de peligro de las especies se utilizaron finalmente para estimar el riesgo pesquero; sin embargo, el resto de los pasos se discutirán en la sección 3.5.2 sobre EVC específicas para pesquerías y aspectos socioeconómicos.

El último enfoque de EVC ecológica destacado fue desarrollado inicialmente como un índice de riesgo climático global, pero ha sido adaptado para las pesquerías canadienses. Boyce et al. (2022) evaluaron casi 25.000 especies a nivel global utilizando MDE como distribución base de una especie y desarrollaron tres índices: exposición (el encuentro de la especie con condiciones climáticas peligrosas), sensibilidad (susceptibilidad) y adaptabilidad (la resiliencia de la especie a las condiciones cambiantes), que se combinaron en la vulnerabilidad climática de la especie y luego se colocaron en categorías de riesgo climático (por ejemplo, insignificante, moderado, alto, crítico). La ventaja de este enfoque es que es espacialmente explícito y se proporciona una categoría de riesgo climático de forma espacial. El análisis global se realizó en una cuadrícula global de $1^\circ \times 1^\circ$, mientras que este enfoque se está adaptando para

las aguas del Atlántico canadiense, para aproximadamente 2.000 especies, a una resolución espacial de 0,25°. Al igual que Pita et al. (2021), la salida de este índice de riesgo climático se incorpora en pasos posteriores para evaluar la vulnerabilidad pesquera en su conjunto. Este trabajo se ampliará en las secciones 3.5.2.

3.5.2 Pesquerías y aspectos socioeconómicos

Aunque menos comunes que las EVC de especies, se han desarrollado EVC pesqueras y socioeconómicas en diversas regiones. Como se mencionó anteriormente, la ERC desarrollada para los peces del Mar Mediterráneo calculó una puntuación de peligro para cada especie (Pita et al. 2021). Luego se calculó una puntuación de peligro pesquero para cada país con embarcaciones que pescan en el Mar Mediterráneo con base en la proporción de capturas de cada país. A continuación, se desarrolló un indicador de exposición pesquera para cada país a partir del porcentaje de la fuerza laboral en la pesca, el porcentaje del PIB aportado por los desembarques de mariscos y la proteína de pescado como proporción de la proteína animal (Figura 4b). También se calculó un indicador de vulnerabilidad para cada país con base en tres factores socioeconómicos: el Índice de Desarrollo Humano, los subsidios a la pesca como porcentaje de los desembarques totales y el número de publicaciones científicas relacionadas con la gestión pesquera en proporción al tonelaje desembarcado del país (Figura 4c). Las puntuaciones de peligro pesquero, exposición y vulnerabilidad se combinaron para obtener un valor de riesgo pesquero general para cada país (Figura 4d). Si bien utilizó múltiples herramientas, como indicadores y evaluaciones de riesgos, este ejercicio puso de manifiesto las marcadas diferencias en la ERC entre los países del norte y del sur del Mediterráneo (Pita et al. 2021). Este tipo de trabajo podría ser utilizado por los organismos regionales de pesca para comprender mejor qué países pueden ser los más vulnerables al cambio climático desde una perspectiva pesquera.

Al igual que el enfoque mediterráneo de ERC, el enfoque canadiense de EVC combina tres componentes importantes: el ecológico (índice de riesgo climático; mencionado anteriormente en 3.5.1), el de infraestructura (pesquerías) y el de gestión (Boyce et al. 2023). En el componente de infraestructura, la vulnerabilidad económica de las pesquerías se evalúa a través del índice de vulnerabilidad de la infraestructura costera (CIVI). El CIVI es una herramienta de adaptación a escala nacional para el Departamento de Pesca y Océanos de Canadá (DFO) para evaluar la vulnerabilidad de los puertos. De manera similar a otros enfoques de EVC, el CIVI se divide en tres subíndices: exposición climática (por ejemplo, cambio del nivel del mar, viento, oleaje), sensibilidad (por ejemplo, condición y protección del puerto) y adaptabilidad (por ejemplo, variabilidad en el costo de los reemplazos por daños). Estas tres puntuaciones se combinan para obtener la puntuación de infraestructura o socioeconómica (CIVI). Para el componente de gestión, se está diseñando una encuesta que se proporcionará a los gestores de pesquerías para ayudar a evaluar cómo puede tenerse en cuenta el clima en las decisiones de gestión y determinar las barreras y los recursos necesarios para apoyar las pesquerías resilientes al clima. Los tres componentes se integran en un marco más amplio desarrollado por investigadores canadienses denominado Marco de Adaptación al Cambio Climático para Pesquerías (CAFF) (Boyce et al. 2023).

El Environmental Defense Fund (EDF) ha desarrollado su propio proceso de EVC por etapas y lo ha aplicado a las pesquerías de las Bahamas y Belice. Al igual que los ejemplos anteriores de la sección 3.5.1, se desarrolló inicialmente una EVC ecológica para peces que replica el método de EVC del Servicio Nacional de Pesquerías Marinas de la NOAA; sin embargo, el enfoque del EDF permitió que las clasificaciones finales de vulnerabilidad cambiaran según los aportes de los pescadores locales (Carroll et al. 2023). Una vez generadas las clasificaciones finales ajustadas de vulnerabilidad específicas por especie, esas clasificaciones se insertarán como puntuación de exposición en una EVC de segundo nivel centrada en la pesquería. Este proceso se repitió en los niveles de pesquería y comunidad pesquera, con atributos de sensibilidad específicos de cada etapa y puntuaciones de exposición procedentes de cada nivel previo.

3.6 PLANIFICACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

La planificación de escenarios es una herramienta para ayudar a los tomadores de decisiones a prepararse para futuros posibles. Esta herramienta no predice el futuro, sino que facilita la presentación de una serie de futuros posibles para prepararse (Schwartz 1996, Peterson et al. 2003). En un contexto de pesquerías resilientes al clima, puede utilizarse para ayudar a los gestores pesqueros y otras partes interesadas relevantes a prepararse, mediante un enfoque participativo, para la variedad de formas en que el cambio climático podría impactar las pesquerías, tanto positiva como negativamente. Este proceso generalmente incluye los siguientes pasos: i) identificar los factores clave de cambio, ii) determinar las incertidumbres importantes, iii) desarrollar escenarios plausibles dentro del contexto de esas incertidumbres, iv) identificar acciones y recomendaciones que consideren esos escenarios, y v) desarrollar puntos de activación clave y monitorear los cambios. La planificación de escenarios se ha aplicado en una variedad de campos, pero a continuación nos enfocamos en algunos ejemplos en las pesquerías marinas que no solo evalúan los impactos y vulnerabilidades en los tres niveles (**ecosistémico/ecológico, pesquero y de gestión**), sino que también brindan posibles ideas y acciones de adaptación de la gestión (Paso 4: identificar posibles acciones de adaptación, Figura 1).

3.6.1 Estudio de caso de la costa este de EE. UU.

A lo largo de la costa este de EE. UU., múltiples organizaciones de gestión pesquera son responsables de gestionar los stocks de peces en sus regiones específicas. A medida que el cambio climático provoca desplazamientos espaciales en las distribuciones de las especies, pueden surgir posibles problemas jurisdiccionales y de gobernanza. Por ejemplo, ¿cómo pueden los gestores prepararse mejor para una situación en la que una especie objetivo se desplaza a una nueva región que no tiene un plan de gestión pesquera establecido? ¿Qué sucede con los pescadores que poseen una licencia para pescar una especie que ya no ocupa su región o viceversa? El ejercicio de planificación de escenarios fue desarrollado por múltiples participantes y partes interesadas dentro de las diversas organizaciones de gestión para ayudar a estos grupos a prepararse mejor para los impactos climáticos en los próximos 20 años (MAFMC 2023). En primer lugar, se establecieron y compartieron con las partes interesadas las fuerzas que impulsan los cambios oceanográficos, biológicos, sociales y económicos. Posteriormente, un grupo de 70 partes interesadas, que iban desde gestores, científicos pesqueros, pescadores, trabajadores de la industria y defensores de los recursos, colaboró en un taller de construcción de escenarios para desarrollar escenarios plausibles dentro de los siguientes ejes de incertidumbre: salud de la productividad de los stocks, previsibilidad del cambio en las condiciones oceánicas y la distribución de las especies, y adaptabilidad de la industria (véase la Figura 5). Estos escenarios fueron refinados y reducidos a cuatro escenarios plausibles principales (MAFMC 2023). En un segundo taller, se reunieron representantes de las organizaciones participantes con el objetivo de formar recomendaciones de gobernanza, gestión y monitoreo para abordar los problemas comunes encontrados en todos los escenarios. Las recomendaciones se agruparon en acciones de alta, media y baja prioridad, y se crearon dos grupos de liderazgo climático para evaluar y supervisar la implementación de cualquier acción.

3.6.2 Estudio de caso de la pesquería artesanal de Sudáfrica

Se desarrolló un ejercicio de planificación de escenarios similar para una pesquería artesanal en Sudáfrica con un enfoque más fuerte en la economía (Gammage y Jarre 2021). Tras identificar los factores de cambio (es decir, los factores de estrés) a través de métodos de encuesta cualitativos y cuantitativos con pescadores, se utilizaron herramientas de toma de decisiones estructuradas (HTDE) para proporcionar conocimiento adicional sobre esos factores (por ejemplo, cambios en las corrientes y la TSM óptima). Las HTDE consisten en mapeo causal y redes de creencias bayesianas. Para una explicación detallada de estos métodos, véase Gammage y Jarre (2021). Esta fase de desarrollo de escenarios se centró en dos ejes principales cruzados: "acceso al capital financiero" y "acceso a los recursos marinos", y se complementó

con otras dos fuerzas impulsoras: "cambio climático" y "disponibilidad de peces". Esto resultó en cuatro escenarios plausibles (véase la Figura 6 en Gammage y Jarre 2021). Aunque es un estudio de caso, este ejercicio creó la oportunidad para que un grupo diverso de partes interesadas interactuara y visualizara los problemas marinos desde diferentes perspectivas y escalas. También demostró que incorporar un enfoque ascendente en la gestión pesquera artesanal con aportes directos del conocimiento local y ecológico puede ser importante al informar a los responsables de políticas.

3.6.3 Estudio de caso del salmón del Atlántico de EE. UU.

Para mejorar la resiliencia de las poblaciones de salmón del Atlántico al cambio climático, el Servicio Nacional de Pesquerías Marinas de la NOAA aplicó la planificación de escenarios (Borggaard et al. 2019). Al igual que los otros ejemplos de planificación de escenarios, se identificaron los factores climáticos/físicos y no climáticos en los entornos de agua dulce, estuarino y oceánico habitados por el salmón a lo largo de su ciclo de vida. Estos factores se describieron a los participantes en la planificación de escenarios, que incluían expertos como investigadores y gestores del salmón, científicos del clima y de las cuencas hidrográficas y fisiólogos de peces. Las condiciones climáticas (cálido/más húmedo frente a cálido/más seco) y la accesibilidad del hábitat de agua dulce se seleccionaron como los dos ejes de incertidumbre primarios cruzados. Esto llevó a cuatro escenarios plausibles, en los que los participantes los utilizaron para destacar las acciones de investigación y gestión de alta prioridad necesarias para la recuperación y mitigación de los efectos de los futuros escenarios plausibles.

3.7 MODELOS DE ECOSISTEMA

Los modelos de ecosistema son una poderosa herramienta diseñada para desentrañar las complejas relaciones tróficas multidimensionales entre las especies individuales y el entorno, permiten a los investigadores comprender mejor el funcionamiento de los ecosistemas marinos, su integridad, y pueden facilitar una mejor comprensión de los impactos de perturbaciones específicas como la pesca y el cambio climático. Ahora existen varios ejemplos de modelos de ecosistema que se utilizan para demostrar cómo las pesquerías industrializadas de atún han contribuido a alteraciones en la estructura y dinámica de los ecosistemas marinos (Cox et al. 2002, Polovina et al. 2009, Griffiths et al. 2019), principalmente como resultado de que las pesquerías de atún impactan a las especies objetivo y no objetivo (por ejemplo, atunes, peces de pico, tiburones) que ocupan altos niveles tróficos ($NT > 4,0$) y pueden ejercer una fuerte regulación predatoria de las poblaciones de especies en niveles tróficos inferiores (Baum y Worm 2009, Griffiths et al. 2013).

Los modelos de ecosistema brindan la oportunidad de explorar los impactos del cambio climático a los **niveles ecosistémico/ecológico, pesquero y de gestión**. Por ejemplo, Woodworth-Jefcoats et al. (2015) desarrollaron un modelo Ecopath con Ecosim (EwE) y un modelo de red alimentaria basado en el tamaño (SBFW) para el Pacífico Norte central, impulsados por resultados de ESM que tomaban en cuenta específicamente los impactos de la estratificación vertical sobre la densidad del fitoplancton. Encontraron que para finales del siglo XXI, como resultado del cambio climático, la biomasa de peces grandes podría disminuir en un 15% y un 30% para los modelos EwE y SBFW, respectivamente. En otra simulación con modelos de ecosistema, se encontró que incorporar regímenes de productividad como resultado del cambio climático y crear mortalidades por pesca específicas de cada régimen produjo mayores rendimientos y menos cierres pesqueros en comparación con el enfoque tradicional de F constante (Fu et al. 2013). En el modelo de ecosistema completo Atlantis para el Golfo de Alaska, la temperatura está vinculada a los procesos biológicos de todos los grupos funcionales, incluyendo escalares de abundancia dependientes de la temperatura basados en los rangos de tolerancia térmica específicos de la especie, el efecto de la temperatura sobre el éxito reproductivo y la influencia de la temperatura sobre las tasas metabólicas que influyen en el crecimiento y los procesos biogeoquímicos. Múltiples escenarios climáticos

de aumento de temperatura condujeron a aumentos proyectados en el peso por edad y mayor mortalidad natural en peces forrajeros y peces de fondo (Rovellini et al. 2025).

La CIAT cuenta actualmente con un modelo de ecosistema desarrollado para el OPO ([SAC-10-15](#); Olson y Watters 2003), que incorpora algunos forzamientos ambientales. Bajo el supuesto de que el ENSO probablemente afecta a los niveles tróficos medios y altos en el OPO, se incorporó la relación entre las anomalías de la temperatura de la superficie del mar y las concentraciones de clorofila para simular los efectos ascendentes de la temperatura sobre la biomasa de fitoplancton grande. El modelo también intentó incorporar los efectos de la temperatura sobre la producción de huevos por parte de los depredadores y cómo esas interacciones podrían afectar la vulnerabilidad de los depredadores en proceso de reclutamiento a la depredación.

3.8 EVALUACIONES DE POBLACIONES BASADAS EN INFORMACIÓN CLIMÁTICA

3.8.1 Integración de las evaluaciones de poblaciones y el entorno

Las evaluaciones de poblaciones utilizan información demográfica de las especies y de las pesquerías para evaluar los efectos de la pesca sobre las poblaciones de peces, teniendo en cuenta la incertidumbre. Este proceso puede dar lugar a una determinación del estado del stock, niveles de captura futuros proyectados y rendimientos o intensidades de pesca recomendados. Los científicos hacen recomendaciones sobre los niveles de cosecha sostenibles o las mortalidades por pesca basándose en los resultados de las evaluaciones de poblaciones, para que los gestores pesqueros puedan tomar decisiones informadas sobre las medidas de gestión.

Se han desarrollado múltiples enfoques que intentan incorporar el entorno y el ecosistema en el proceso de evaluación de poblaciones para tener en cuenta los impactos e interacciones entre el cambio ambiental y climático y los stocks/especies (**nivel ecosistémico/ecológico**). Las herramientas climáticas mencionadas anteriormente, como las EVC y los indicadores, también pueden ayudar a priorizar las especies para las que se realizan evaluaciones de poblaciones. Las variables ambientales se han utilizado para informar las tendencias históricas en los procesos biológicos como el reclutamiento, el crecimiento, la abundancia y la distribución, así como las anomalías e incertidumbres en las evaluaciones (Pepin et al. 2022). La incorporación de variables oceanográficas y ecológicas en las evaluaciones de poblaciones ha sido más frecuente en comparación con la incorporación de variables de forzamiento climático. El software de evaluación de poblaciones Stock Synthesis (Methot Jr y Wetzel 2013) permite la inclusión de variables ambientales para los procesos biológicos (por ejemplo, reclutamiento, crecimiento, mortalidad natural) y pesqueros (selectividad y capturabilidad). Si la relación entre el entorno y la dinámica de un stock está estrechamente acoplada, los datos están disponibles, existe una forma de incorporar esa relación en el proceso de evaluación de poblaciones y la relación puede preverse con una incertidumbre relativamente pequeña, entonces puede ser apropiado ampliar la evaluación de poblaciones para incluir variables ambientales o ecosistémicas (Lynch et al. 2018).

Las evaluaciones de poblaciones son generalmente robustas ante los cambios en el reclutamiento, que es la principal fuente de cambios en la abundancia, porque estiman el reclutamiento anual (o trimestral en el caso de los atunes tropicales), en particular si se combinan con una gestión dinámica (por ejemplo, puntos de referencia dinámicos). Por lo tanto, los impactos del cambio climático sobre el reclutamiento es poco probable que sesguen las evaluaciones de poblaciones. Sin embargo, pocas evaluaciones de poblaciones, en particular las de los atunes tropicales, tienen estimaciones fiables y variables en el tiempo del crecimiento, la mortalidad natural o la relación longitud-peso. Por lo tanto, las evaluaciones de poblaciones pueden no ser necesariamente robustas ante los cambios en estos procesos impulsados por el clima. Las evaluaciones de poblaciones pueden ser robustas ante los cambios en la disponibilidad, la capturabilidad y/o la selectividad, pero es probable que sea específico de cada aplicación. Además, los cambios en la relación stock-reclutamiento impulsados por el clima (por ejemplo, la pendiente de la curva

de stock-reclutamiento se vincula a una variable ambiental) pueden no ser detectables y la gestión puede no ser robusta ante estos cambios.

Los enfoques contemporáneos para desarrollar índices de abundancia y los datos de composición asociados utilizados en las evaluaciones de poblaciones podrían ser robustos al cambio climático porque se basan en modelos espacio-temporales. Sin embargo, a medida que la distribución espacial del stock cambia, los datos deberían cubrir idealmente toda la distribución del stock (por ejemplo, el área de la encuesta debe cambiar). Para los índices basados en datos de CPUE, esto significa que la pesquería debe desplazarse a donde están los peces. Esto pone de relieve la necesidad de programas de monitoreo que sean robustos al cambio climático. Esto es especialmente relevante dado que las pesquerías de palangre, que se han utilizado tradicionalmente para crear índices de abundancia, han estado contrayendo su rango espacial.

Se debe tener cuidado al incluir variables climáticas en los modelos de evaluación de poblaciones o en la estandarización de los datos de CPUE. Los valores anuales pueden confundirse con la abundancia del stock. Por lo tanto, a menudo es más robusto y apropiado usar covariables estratificadas espacio-temporalmente en la estandarización de la CPUE. En estos casos, es importante especificar correctamente si la covariable ambiental está relacionada con la abundancia o con la capturabilidad.

El marcado ha sido promovido e implementado como enfoque candidato para desarrollar información sobre la abundancia de atunes, pero ha tenido un éxito relativamente limitado, especialmente para los atunes tropicales, debido a varios factores, incluidas las limitadas oportunidades para marcar peces y la no mezcla de las marcas con toda la población. Sin embargo, un enfoque reciente que utiliza métodos de modelado espacio-temporal de escala fina para tener en cuenta la no mezcla de las marcas ha mostrado ser prometedor para estimar la abundancia absoluta de los stocks de atún. La estimación de la abundancia absoluta es mucho más informativa que los enfoques basados en índices de abundancia relativa que requieren la influencia de las capturas en el índice para escalar la abundancia absoluta o varios supuestos para derivar la abundancia absoluta a partir de datos de composición. El modelo de marcado espacio-temporal modela explícitamente el movimiento de las marcas con base en datos ambientales. Por lo tanto, también tiene el potencial de manejar los cambios en la distribución espacial del entorno y, en consecuencia, del stock, causados por el cambio climático. Además, dado que también utiliza información de marcas de archivo para informar el movimiento, puede tener en cuenta el movimiento de los peces fuera del alcance de la pesquería donde no se recuperan las marcas convencionales. Por lo tanto, tiene el potencial de proporcionar un enfoque de monitoreo y evaluación que sea robusto al cambio climático. Este enfoque ha sido utilizado por la CIAT para estimar la abundancia absoluta para su uso en la evaluación del stock de barrilete del OPO ([SAC-15 INF-G](#)). Estas estimaciones se basan en datos de marcado limitados, pero ya se ha producido una estimación con un CV del 30%, lo que implica avances significativos dado que es una estimación de abundancia absoluta. El enfoque podría usarse con los datos actuales para producir también estimaciones para los stocks del OPO de atún patudo y atún aleta amarilla. Los datos de marcado mejorados a través de futuras cruceros de marcado producirían estimaciones aún más fiables y proporcionarían un monitoreo y evaluación robustos al cambio climático.

El marcado de parientes cercanos puede superar muchos de los problemas con el marcado tradicional, pero ha tenido una aplicación limitada y proporciona la información más útil sobre la abundancia absoluta de la población adulta. Aunque un modelo CKMR diseñado apropiadamente proporcionará estimaciones de la abundancia de juveniles también, los datos adicionales sobre la abundancia de juveniles pueden ser útiles para refinar las estimaciones, especialmente dado que muchos métodos de pesca del atún (por ejemplo, la pesca con cerco) capturan principalmente juveniles.

3.8.2 Múltiples estudios de caso

La inclusión de forzamientos ambientales en los procesos de evaluación de poblaciones ha ocurrido en algunos casos. Frente a la costa este de EE. UU., la temperatura de fondo se incorporó en la evaluación de poblaciones del pez mantequilla y el scup (NEFSC 2015, Adams 2018). Específicamente, se utilizó la temperatura de fondo reconstruida (hindcast) para desarrollar un índice de idoneidad del hábitat o un modelo de hábitat térmico. Luego se calculó la proporción del hábitat idóneo disponible muestreado por la encuesta científica, que informó el parámetro de capturabilidad de la encuesta.

Se desarrolló un modelo de idoneidad de hábitat similar para múltiples etapas de vida de especies de mero en el Golfo de México que se solapaban con eventos de mareas rojas. Luego se incorporó un índice de severidad de las mareas rojas como variable que influye en la mortalidad natural (SEDAR 2019). Debido a su corta vida, el calamar volador (*Ommastrephes bartramii*) está fuertemente influenciado por el entorno, por lo que se desarrolló un modelo de producción excedentaria dependiente del entorno para su evaluación de stock. Específicamente, la capacidad de carga se vio influida por la variabilidad en el hábitat de desove favorable impulsada por la temperatura, y la tasa de crecimiento intrínseco se vio afectada por la variabilidad en el hábitat de alimentación atribuida a diferentes rangos de temperatura. La inclusión de la temperatura mejoró el ajuste del modelo y llevó a puntos de referencia más conservadores en comparación con el modelo convencional (Wang et al. 2016).

En las evaluaciones de poblaciones canadienses, el 21% (38/178) incorporó variables ambientales (Pepin et al. 2022). En los modelos de población, los parámetros que varían en el tiempo, como la mortalidad natural, se estimaron para tener en cuenta la depredación o el crecimiento, y la capturabilidad se estimó para tener en cuenta las cambiantes condiciones oceánicas. Otras evaluaciones de poblaciones utilizaron variables ambientales reales, como la temperatura del fondo, como covariables en modelos estadísticos utilizados para predecir el reclutamiento, la biomasa del stock reproductor o la productividad (Pepin et al. 2022). En algunos casos, la CPUE se estandarizó mediante una variable ambiental para mejorar los índices de abundancia o hacer que la capturabilidad varíe en el tiempo. También se consideraron los efectos de las variables ambientales sobre la variación en las migraciones o la disponibilidad del hábitat de desove. Lee et al. (2017) utilizaron análisis de simulación para investigar la variación temporal impulsada por el clima en el movimiento del atún rojo. De las variables ambientales, las variables oceanográficas y ecológicas se aplicaron con mayor frecuencia en comparación con las variables de forzamiento climático. Por ejemplo, las variables de forzamiento climático a largo y corto plazo, como el Índice de Oscilación Decadal del Pacífico, se aplicaron a las especies anádromas (Pepin et al. 2022).

El Modelo Espacial de Dinámica de Ecosistema y Poblaciones (SEAPODYM) es un modelo numérico desarrollado para examinar las interacciones físico-biológicas entre las poblaciones de peces y el ecosistema pelágico (Lehodey et al. 2008). Aunque no es un modelo de evaluación de poblaciones, SEAPODYM puede utilizarse para la gestión del stock de atún en relación con la variabilidad climática y ecosistémica. Se ha aplicado en el WCPO para todos los atunes tropicales, y las proyecciones pueden hacerse a escala del Pacífico.

En 2011, la CIAT celebró un taller sobre el Uso de la Oceanografía para la Evaluación y Gestión de Stocks Pesqueros y produjo un borrador de manuscrito que resume el estado de la ciencia (Maunder et al. [sin publicar](#)). La CIAT ha realizado varios estudios que investigan el uso de datos ambientales en la evaluación de stocks pesqueros y análisis relacionados. Por ejemplo, Maunder y Watters (2003) desarrollaron un enfoque estadísticamente riguroso para incluir datos ambientales en los modelos de evaluación de stocks y realizar pruebas de hipótesis, particularmente cuando se combina con el enfoque de efectos aleatorios/espacio de estados defendido por Maunder y Deriso (2003). Hinton (1996) desarrolló un enfoque mecanístico para tener en cuenta los factores ambientales, de comportamiento y fisiológicos al estandarizar los datos de CPUE, considerando la profundidad del arte de pesca de palangre y las preferencias de hábitat de la especie. El enfoque se aplicó al marlín azul. Maunder et al. (2006) pusieron

el enfoque en un marco estadístico y (Maunder y Hinton 2006) lo implementaron usando una red neuronal. Aunque las evaluaciones de stocks anteriores de la CIAT proporcionaban proyecciones, las evaluaciones de stocks actuales de la CIAT no proporcionan proyecciones futuras.

3.9 EVALUACIÓN DE ESTRATEGIAS DE ORDENACIÓN

3.9.1 Integración de la evaluación de estrategias de ordenación y el cambio climático

La evaluación de estrategias de ordenación (EEO) es una herramienta estratégica que consiste en utilizar simulaciones para evaluar la efectividad y la solidez de los procedimientos de gestión alternativos (es decir, herramientas estratégicas y/o tácticas) dado un conjunto de objetivos (Punt et al. 2016). Las EEO pueden probar los procedimientos de gestión bajo diferentes tipos de datos, múltiples enfoques analíticos y diversos procesos específicos que conducen a una medida de gestión. Por lo tanto, la EEO es una herramienta que tiene el potencial de identificar y tener en cuenta los impactos del cambio climático y ambiental a los **niveles ecosistémico/ecológico, pesquero y de gestión**, y también proporcionar posibles acciones de adaptación de la gestión (Paso 4: identificar posibles acciones de adaptación, Figura 1). Se han desarrollado dos enfoques principales para incorporar el cambio climático y los impactos ambientales en las EEO: el enfoque mecanístico y el empírico (Punt et al. 2014). El enfoque mecanístico utiliza los resultados de los modelos climáticos globales para estimar la relación entre el entorno y los procesos específicos en la dinámica de las poblaciones, con el fin de predecir las tendencias de las poblaciones. Esto implica identificar los mecanismos subyacentes a los impactos climáticos específicos sobre los procesos de las poblaciones (crecimiento, reclutamiento, etc.), evaluar el escenario y el modelo climático apropiados para la región de interés, hacer un *downscaling* preciso del modelo climático a la región de interés, incorporar las variables ambientales extraídas en los modelos de proyección y crear proyecciones sobre las que se puedan extraer medidas de gestión. Representar la incertidumbre es un aspecto crítico de este proceso, particularmente debido a la incertidumbre sobre la precisión con que las variables ambientales pueden predecir los parámetros de la dinámica de las poblaciones y sobre la precisión del modelo climático real proyectado hacia el futuro. El enfoque empírico utiliza tendencias al aplicar la relación entre el clima y diversos parámetros en el modelo operativo, lo que resulta en tendencias plausibles en lugar de proyecciones. El enfoque empírico se utiliza cuando los impactos climáticos o ambientales son hipotéticos en lugar de estar respaldados por datos, y puede aplicarse para probar qué estrategias de gestión genéricas son robustas ante los cambios en los parámetros biológicos.

Punt et al. (2014) describieron algunas formas comunes en que el cambio climático puede incorporarse en las EEO. Estas incluyen el enfoque de **B₀** dinámica (biomasa no explotada), el enfoque de ventana móvil y el enfoque STARS. El enfoque de **B₀** dinámica permite que la biomasa no explotada estimada varíe con el tiempo para reflejar los cambios en los parámetros biológicos de procesos como el reclutamiento, el crecimiento o la mortalidad natural. El enfoque de ventana móvil consiste en utilizar puntos de referencia de biomasa basados en estimaciones del reclutamiento durante un número específico de años (por ejemplo, 25 años). Este enfoque da como resultado un rango de puntos de referencia de biomasa que reflejan idealmente la variedad de condiciones ambientales experimentadas a lo largo del tiempo. El enfoque de análisis secuencial de prueba t de cambios de régimen (STARS) (Punt et al. 2014) utiliza un algoritmo para delinear regímenes con base en cuán diferentes son los años posteriores del régimen actual. Si suficientes años son similares entre sí pero diferentes del régimen actual, se establece un nuevo régimen. Los puntos de referencia de biomasa, al aplicar las reglas de control de la cosecha, se basarían entonces en el conjunto de años del régimen más reciente.

3.9.2 Múltiples estudios de caso

Se han mostrado resultados mixtos al incorporar los impactos climáticos en las EEO. Punt et al. (2013) utilizaron un enfoque empírico para evaluar el rendimiento de una estrategia de gestión para la langosta de roca en Australia, probando cambios en la mortalidad natural y el crecimiento a lo largo del tiempo, y

no encontraron cambios en el rendimiento. Un estudio mecanístico comparó la estrategia de gestión actual con una estrategia de B_0 dinámica cuando el reclutamiento de la clase de edad 1 fue impulsado por el clima para el abadejo de Alaska del Golfo de Alaska. Las relaciones entre la abundancia de la clase de edad 1 y los índices climáticos (por ejemplo, TSM y precipitación) y su incertidumbre asociada se caracterizaron dentro de un modelo operativo estructurado por edad (A'mar et al. 2009). Encontraron que los resultados eran sensibles al modelo climático específico seleccionado y que el rendimiento de la gestión se deterioraba cuando el reclutamiento era forzado por el clima. Tommasi et al. (2017) utilizaron anomalías de TSM pronosticadas estacionalmente para comparar la biomasa relativa del stock de sardina del Pacífico. Las directrices de cosecha donde las predicciones de anomalías de TSM informaban las predicciones de biomasa del stock condujeron a mejoras en la biomasa del stock y el rendimiento, y a reducciones en la probabilidad de que la biomasa y el rendimiento cayeran por debajo de los niveles socioeconómicos y ecológicos permisibles.

Otro estudio utilizó la EEO para ayudar a informar la gestión espacial para la mitigación de las capturas incidentales en la pesquería con red agallera a la deriva de pez espada a lo largo de California (Kaplan et al. 2021, Smith et al. 2021). Las capturas de pez espada y las capturas incidentales de tortugas laúd y tiburón azul se simularon en respuesta a áreas cerradas estáticas y dinámicas (que incorporan inherentemente el cambio ambiental) y se generaron 10 métricas de rendimiento, como las capturas totales de pez espada por temporada de pesca y el número de tortugas capturadas por pez espada capturado (Figura 7). Encontraron que el área cerrada altamente dinámica tuvo un mejor desempeño bajo el supuesto de disponibilidad sustancial de datos y un hábitat de especies dinámico. También a lo largo de la costa oeste de EE. UU., se sabe que el reclutamiento del sable negro está relacionado con el forzamiento climático de gran escala a través del nivel del mar y las comunidades de zooplancton. Haltuch et al. (2019) determinaron mediante EEO que, a pesar de las pequeñas fluctuaciones en el reclutamiento debidas a los niveles futuros del mar, el stock de sable negro no cae por debajo del tamaño del stock que iniciaría el cierre de la pesquería. Un ejemplo final utilizó la EEO para informar la gestión bilateral de la pesquería de merluza entre EE. UU. y Canadá (Kaplan et al. 2021). Se determinó la sensibilidad del rendimiento de la regla de control de la cosecha bajo movimientos impulsados por el clima y cambios en la selectividad dependiente de la edad de las pesquerías de ambos países. Las pruebas de simulación mostraron que la regla de control de la cosecha actual era suficientemente robusta ante los escenarios climáticos.

3.10 ENCUESTAS PESQUERAS

Una herramienta importante para identificar los impactos climáticos y las vulnerabilidades en las **pesquerías** consiste en encuestar a la industria pesquera. Los tres estudios de caso que se presentan a continuación destacan los distintos tipos de encuestas pesqueras y cómo brindan información sobre la percepción que tiene la industria pesquera sobre el cambio climático.

El Manual de Adaptación al Cambio Climático fue desarrollado por investigadores, gestores y la industria pesquera en Australia para comprender la sensibilidad de los pescadores al cambio físico y ecológico, con qué facilidad puede adaptarse la pesquería al cambio, y si se necesita un proceso más elaborado de cambio de planes y métodos de gestión para adaptarse al cambio (Fulton et al. 2020). Parte del manual se centra en el riesgo pesquero a través del desarrollo de tres encuestas diseñadas para obtener asesoramiento de las partes interesadas sobre la adaptación autónoma (acciones que los pescadores pueden tomar dentro de la estructura de gestión actual). El asesoramiento incluiría las posibles respuestas de adaptación, la probabilidad de implementar esas respuestas y sus posibles impactos económicos y sociales. Con base en las respuestas de las partes interesadas, se calcula una puntuación de riesgo pesquero. Los diferentes métodos de implementación de la encuesta pueden variar desde una encuesta-cuestionario en línea hasta entrevistas telefónicas o presenciales, pasando por la elicitación de expertos

o talleres. La Figura 6 (tomada de la Tabla 4-5 en Fulton et al. 2020) describe esos diferentes métodos y proporciona ventajas y desventajas de cada método. Las encuestas podrían utilizarse para discutir varias posibles respuestas de adaptación relacionadas con los cambios en la abundancia, la distribución, la calidad y la fenología de las especies objetivo (es decir, la temporada de pesca), como cambios en el esfuerzo, el desplazamiento de la ubicación de pesca, el cambio de especie objetivo, la inversión en nueva tecnología, etc. Fulton et al. (2020) describen que, a partir de las respuestas de los participantes, el riesgo pesquero puede derivarse de tres variables de riesgo: el número de respuestas disponibles para que los pescadores se adapten a un cambio ecológico, la probabilidad de que los pescadores puedan implementar esas respuestas, y el impacto económico y social de ese cambio ecológico.

En Puerto Rico, para comprender las percepciones de los pescadores y su capacidad de adaptarse al cambio ambiental y climático, los investigadores encuestaron a pescadores en diferentes asociaciones pesqueras y sitios de desembarque (Seara et al. 2020). Los resultados de la encuesta indicaron que poco menos de la mitad de los encuestados afirmaron haber observado cambios en sus recursos marinos que, según ellos, estaban relacionados con el cambio climático, siendo los cambios más comunes la disminución de los stocks de recursos, los desplazamientos del hábitat y los cambios en la composición de las especies. También encontraron que la mayoría de los encuestados han cambiado algún aspecto de su actividad pesquera en respuesta al cambio ambiental, como el cambio de los caladeros de pesca, los cambios en el arte, la pesca en aguas más profundas y la pesca más lejos de la costa (Seara et al. 2020).

Un ejemplo final utilizó una encuesta en línea para comprender las percepciones de los pescadores comerciales del Pacífico de Canadá sobre los impactos climáticos, así como sus respuestas a dichos impactos (Harper et al. 2023). Los resultados de la encuesta indicaron que el 77% está de acuerdo en que el cambio climático está ocurriendo, el 72% cree que el cambio climático perjudicará a las generaciones futuras y el 56% cree que el cambio climático los perjudicará personalmente. Además, el 72% de los pescadores no cree que la gestión pesquera pueda adaptarse y responder rápidamente a las cambiantes condiciones ambientales, el 71% no podría incorporarse fácilmente a una nueva pesquería y el 51% cree que el cambio climático debería considerarse en la gestión pesquera (Harper et al. 2023). Las discusiones también revelaron que la incorporación de voces diversas en la gestión pesquera junto con una mejor comunicación contribuiría al avance de la adaptación climática.

3.11 ENCUESTAS DE GESTIÓN

De manera similar a las encuestas pesqueras dirigidas a los pescadores, las encuestas de gestión dirigidas a los gestores pesqueros son una forma común de comprender qué tan robustas y adaptativas son las medidas de gestión actuales al cambio ambiental y climático.

El Manual de Adaptación al Cambio Climático descrito en la sección 3.10 también incluye una evaluación del riesgo de gestión (Fulton et al. 2020). El manual identifica numerosas respuestas de gestión (herramientas tácticas) que los gestores pesqueros tienen para responder a diversos cambios socioecológicos, incluyendo herramientas basadas en las capturas (por ejemplo, restricciones de desembarque, ajuste de los límites de activación para especies objetivo o de captura incidental), herramientas basadas en el esfuerzo (por ejemplo, limitar o alentar nuevos participantes), herramientas basadas en el arte (por ejemplo, ajustar las restricciones o limitaciones de artes o embarcaciones) y herramientas espaciotemporales (por ejemplo, ajustar/abrir/cerrar áreas de pesca, desplazar el tiempo o la duración de la temporada de pesca). Dado que este taller se centra principalmente en las herramientas estratégicas, las discusiones extensas sobre las muchas herramientas tácticas disponibles para los gestores tendrán lugar en un taller futuro. A pesar de ello, discutimos cómo el riesgo de gestión puede evaluarse a través de muchos atributos, como el número de instrumentos de gestión disponibles (más instrumentos disponibles reduce el riesgo), el tiempo hasta la implementación (un mayor tiempo aumenta el riesgo), la complejidad del proceso de gestión para un cambio regulatorio determinado (mayor

complejidad aumenta el riesgo) y el costo de implementación de la gestión de medidas de gestión en curso o nuevas (mayor costo aumenta el riesgo) (Fulton et al. 2020). Los gestores que realizan esta evaluación de riesgos proporcionarían una puntuación de riesgo para cada uno de estos atributos para calcular el riesgo de gestión general.

También son posibles enfoques más simplificados al encuestar a los gestores. La educación inicial sobre los impactos climáticos en la ecología y la socioeconomía para los profesionales es un primer paso importante. Luego, podría distribuirse una encuesta a los tomadores de decisiones clave para pedirles que identifiquen y clasifiquen qué tan vulnerables son los instrumentos de gestión actuales y potenciales (es decir, las herramientas tácticas) y las medidas de conservación y gestión al entorno y al cambio climático. Por ejemplo, el momento de cierre de una pesquería puede ser apropiado para un año de El Niño, pero podría ser inapropiado (por ejemplo, disminuir el acceso a las especies objetivo o aumentar el acceso a las especies de captura incidental) durante un año de La Niña. Estos enfoques brindan oportunidades únicas para detectar las vulnerabilidades climáticas a **nivel de gestión**.

4. RECOMENDACIONES PRELIMINARES DEL PERSONAL

Tras una revisión exhaustiva de las herramientas estratégicas disponibles y el progreso actual que el personal ya ha logrado en varias herramientas, el personal ha proporcionado una lista preliminar de herramientas relacionadas con el clima que la CIAT podría enfocarse en los próximos tres años, aproximadamente, para lograr el Paso 2 del Marco de Pesquerías Resilientes al Clima de la CIAT (es decir, evaluar los impactos y vulnerabilidades climáticas). La Tabla 1 que figura a continuación enumera las diversas herramientas estratégicas discutidas en la sección 3 y proporciona los pros y los contras de utilizar o desarrollar cada herramienta en el contexto de la CIAT. Dado el período de tiempo relativamente corto (tres años para una primera iteración), el personal ha desarrollado o está considerando un conjunto integral de herramientas, o versiones de ellas, que espera producir y que pueden ayudar a mejorar la resiliencia climática de la CIAT. Afortunadamente, algunas de las herramientas ya están en proceso de desarrollo, lo que las hace fáciles de recomendar que se continúen desarrollando (por ejemplo, datos oceanográficos, MDE, experimentos fisiológicos/de laboratorio, indicadores). Además, muchas de estas herramientas pueden trabajarse simultáneamente. Otras herramientas, como los modelos de ecosistema, las encuestas pesqueras, las evaluaciones de stocks y las EEO, ya han sido desarrolladas (evaluaciones de stocks), están en curso (EEO) o serán actualizadas (modelo de ecosistema, encuestas pesqueras), lo que crea la oportunidad de integrar el entorno en ellas. Dado este contexto, las dos herramientas más ambiciosas que el personal recomienda desarrollar son una EVC y la planificación de escenarios de cambio climático, porque pueden requerir financiamiento adicional y coordinación para involucrar a las partes interesadas a través de talleres presenciales. Afortunadamente, el ejercicio de planificación de escenarios de cambio climático ya ha recibido financiamiento externo del Blue Convergence Fund. El personal también ha identificado el cronograma previsto para el desarrollo e implementación de cada herramienta, asegurando la alineación con el marco y el calendario del plan de trabajo (SAC-15-12). El personal de la CIAT espera revisar esta recomendación preliminar y la lista de herramientas correspondiente con las CPC y las partes interesadas durante el proceso de futuros talleres y discusiones.

Por lo tanto, en relación con las herramientas estratégicas, el personal de la CIAT recomienda que:

Como prioridad para los próximos tres años, la Comisión se centre en desarrollar una Evaluación de Vulnerabilidad Climática (EVC) y un ejercicio de planificación de escenarios de cambio climático, mientras concurrentemente avanza e integra las herramientas relacionadas con el clima ya en marcha, incluyendo los modelos de distribución de especies, los estudios fisiológicos y de laboratorio colaborativos (por ejemplo, el Laboratorio de Achotines), los indicadores oceanográficos, los modelos de ecosistema, las encuestas pesqueras y las evaluaciones de stocks/evaluaciones de estrategias de ordenación, para

cumplir el Paso 2 (evaluar los impactos y vulnerabilidades climáticas) del Marco de Pesquerías Resilientes al Clima de la CIAT.

5. TABLAS

Tabla 1. Herramientas estratégicas descritas en la sección 3, con el nivel de evaluación que cada herramienta puede medir (ecosistémico/ecológico, pesquero, de gestión). Se proporcionan los pros y los contras de desarrollar cada herramienta en el contexto de la CIAT, junto con si el personal recomienda que la CIAT desarrolle cada herramienta y el(los) año(s) en que el personal planea trabajar en ella.

Herramienta	Nivel de evaluación	Pros	Contras	Recomendado (Años)
Datos oceanográficos (condiciones históricas y futuras)	- Ecosistémico/ ecológico - Pesquero	- Base de muchas otras herramientas - Acceso a los datos gratuito - Datos históricos (desde 1993) actualizados hasta 2023 - Sin necesidad de financiamiento	- Requiere un almacenamiento digital considerable	Sí, continuar (2024-2028)
Modelos de distribución de especies (MDE)	- Ecosistémico/ ecológico	- Base de muchas otras herramientas - Desarrollados ya para varias especies, incl. atún - Experiencia interna - Puede realizarse en colaboraciones académicas - Sin necesidad de financiamiento	- Muchas especies objetivo y de captura incidental - Requiere capacidad de cómputo	Sí, continuar (2024-2028)
Experimentos fisiológicos/de laboratorio	- Ecosistémico/ ecológico	- Infraestructura disponible (Lab. Achotines) - Acceso a animales vivos - Experiencia interna	- Consume mucho tiempo - Requiere financiamiento - Algunas especies difíciles de obtener	Sí, continuar (2024-2028)

Herramienta	Nivel de evaluación	Pros	Contras	Recomendado (Años)
		- Colaboraciones académicas/fondos externos		
Indicadores	- Ecosistémico/ ecológico - Pesquero	- Plan de trabajo EcoCard en marcha - Modelo de ecosistema ya desarrollado - Colaboración con otras OROP - Sin necesidad de financiamiento	- Muchos indicadores posibles - CIAT perdió científico de ecosistemas, se requiere capacitación - Modelo de ecosistema requiere actualización	Sí, continuar (2024-2028)
Evaluaciones de vulnerabilidad climática (EVC)	- Ecosistémico/ ecológico - Pesquero	- Proporciona clasificación cualitativa de vulnerabilidad - Se puede realizar para todas las especies/pesquerías a la vez - Muchos grupos ya han desarrollado EVC adaptables (ej. WCPFC) - Participación directa de partes interesadas	- Se requiere tiempo para adaptar una EVC para la CIAT - Requiere mucha planificación para talleres presenciales - Posiblemente EVC separadas por nivel - Podría requerir fondos adicionales	Sí, EVC ecosistémica/ecológica para empezar (2027-2028)
Planificación de escenarios de cambio climático	- Ecosistémico/ ecológico - Pesquero - Gestión	- Puede evaluar el riesgo en los tres niveles - Modelar/adaptar ejercicios ya exitosos - Participación de partes interesadas - Fondos externos ya obtenidos	- Se requiere tiempo para adaptar para la CIAT - Requiere planificación significativa para talleres presenciales	Sí (2026-2027)
Modelos de ecosistema	- Ecosistémico/ ecológico - Pesquero - Gestión	- Puede evaluar el riesgo en los tres niveles - Modelo de ecosistema ya desarrollado - Colaboración con otras OROP	- Complejo y requiere muchos datos - CIAT perdió científico de ecosistemas - Modelo puede necesitar actualizaciones	Sí, >2026
Evaluaciones de poblaciones informadas por el clima	- Ecosistémico/ ecológico	- Ya se tienen evaluaciones de stock de atún - Se están desarrollando enfoques novedosos	- Se han realizado algunos intentos con mínimo éxito - Integración de variables ambientales con éxito limitado	Por determinar

Herramienta	Nivel de evaluación	Pros	Contras	Recomendado (Años)
		<ul style="list-style-type: none"> - Hay muchas formas de informar las evaluaciones con el clima - Se han obtenido fondos para mejorar evaluaciones 		
Evaluación de estrategias de ordenación (EEO)	<ul style="list-style-type: none"> - Ecosistémico/ ecológico - Pesquero - Gestión 	<ul style="list-style-type: none"> - Puede evaluar el riesgo en los tres niveles - EEO de patudo casi completa - Diversas formas de incorporar el entorno 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere mucho tiempo y recursos 	Sí (>2027)
Encuestas pesqueras	<ul style="list-style-type: none"> - Pesquero 	<ul style="list-style-type: none"> - Involucra a las partes interesadas - Relativamente simple de iniciar - Puede combinarse con planificación de escenarios - Potencialmente sin costo 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere gran número de respuestas de pescadores 	Sí (>2026)
Encuestas de gestión	<ul style="list-style-type: none"> - Gestión 	<ul style="list-style-type: none"> - Involucra a las partes interesadas - Una de las pocas oportunidades para evaluar vulnerabilidades de gestión - Puede combinarse con planificación de escenarios 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere gran número de respuestas de gestores 	Sí (2027-2028)

6. FIGURAS

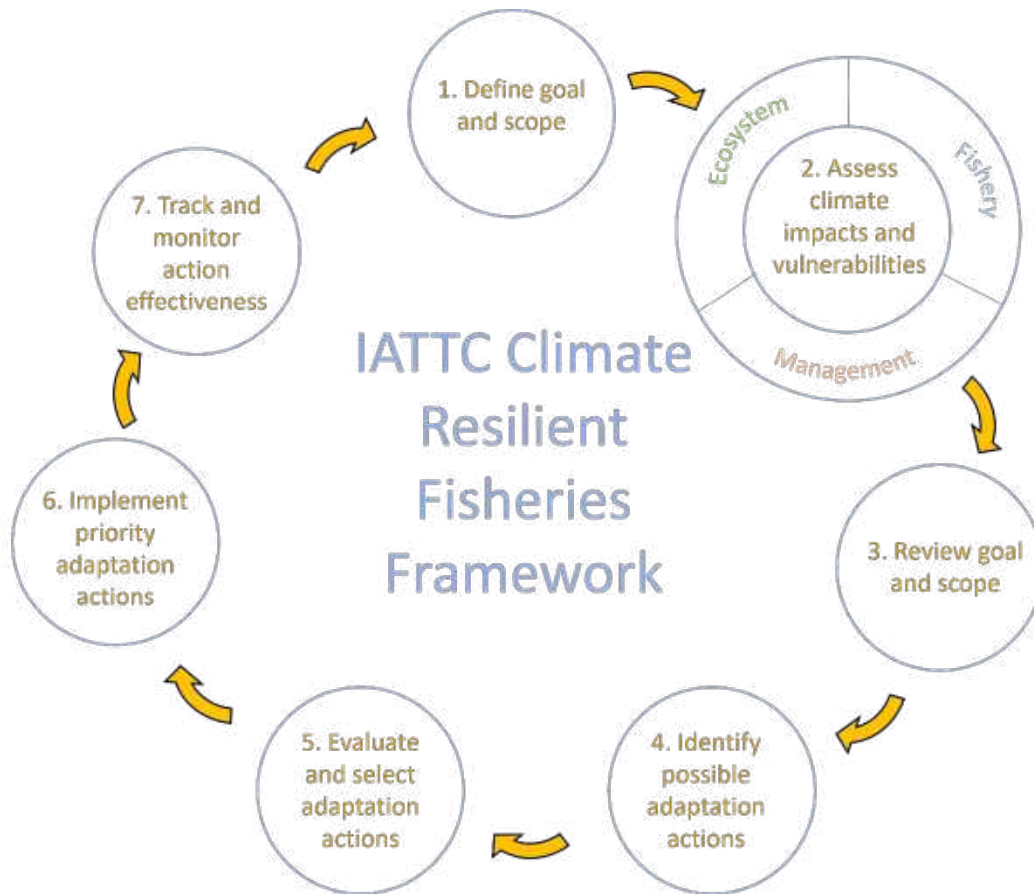


Figura 1. El Marco de Pesquerías Resilientes al Clima de la CIAT, la estructura para la adaptación y la implementación de la gestión pesquera bajo un clima cambiante.

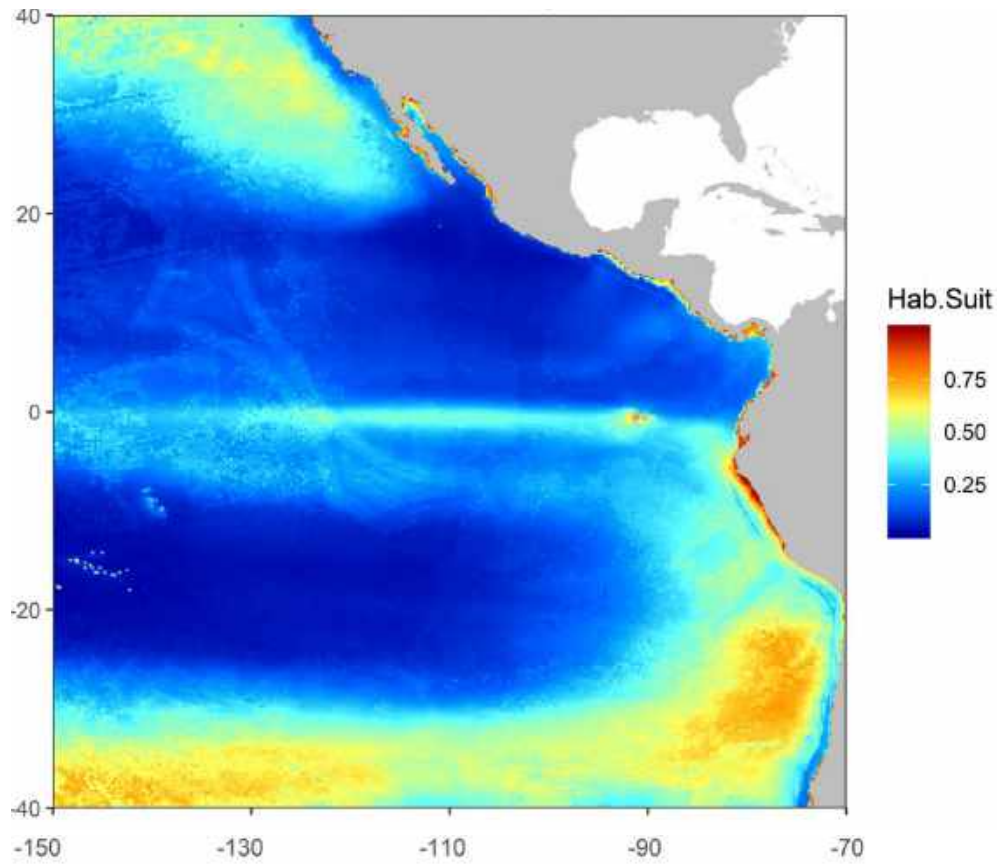


Figura 2. Predicciones medias de idoneidad del hábitat de los modelos de distribución de especies (MDE) de la tortuga laúd en el Océano Pacífico oriental (OPO) de Lopez et al. (2024). Las áreas en rojo, naranja y amarillo son las más adecuadas, mientras que las áreas en azul oscuro son las menos adecuadas.

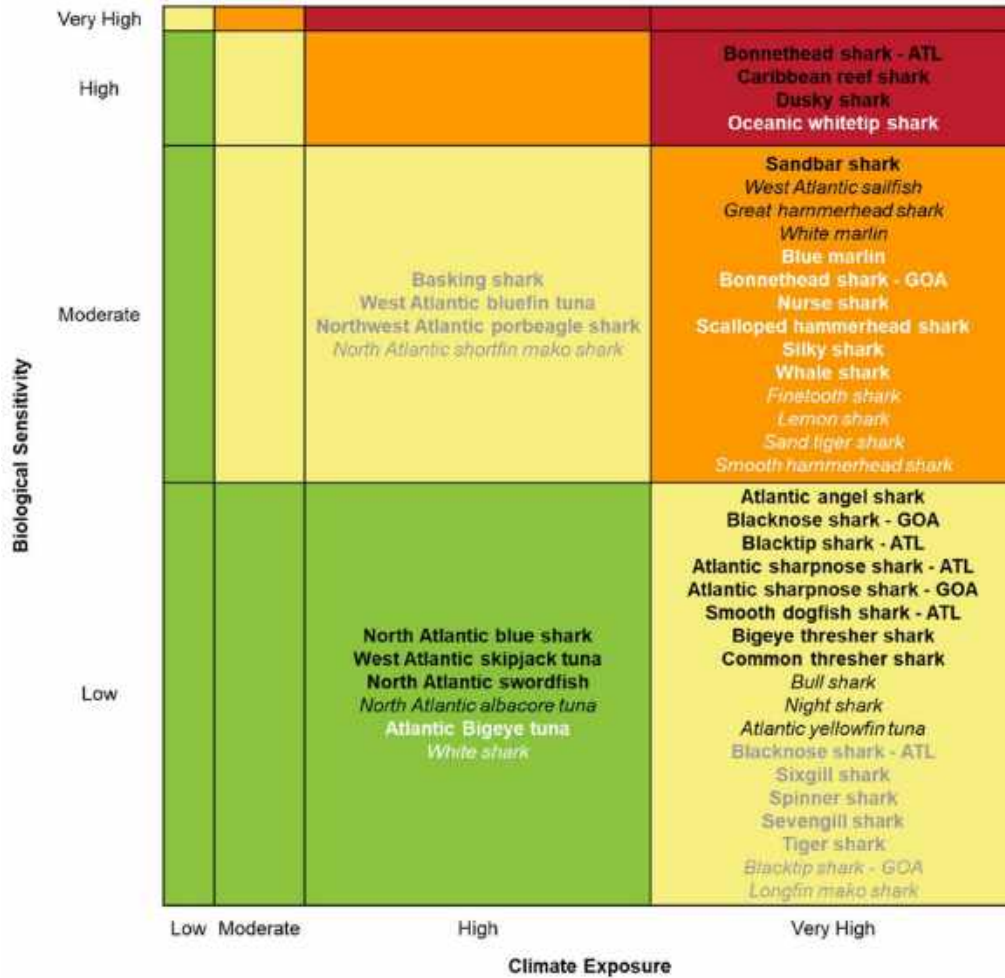


Figura 3. Categorización de vulnerabilidad para las especies altamente migratorias del Atlántico. Las categorías de vulnerabilidad se colorean de verde (Baja) a rojo (Muy Alta). Las especies o stocks en negrita tuvieron una probabilidad >25% de ser colocadas en la siguiente categoría de vulnerabilidad más alta en el análisis de bootstrap; las que están en cursiva tuvieron una probabilidad >25% de ser colocadas en la siguiente categoría de vulnerabilidad más baja en ese análisis. De Loughran et al. (2025).

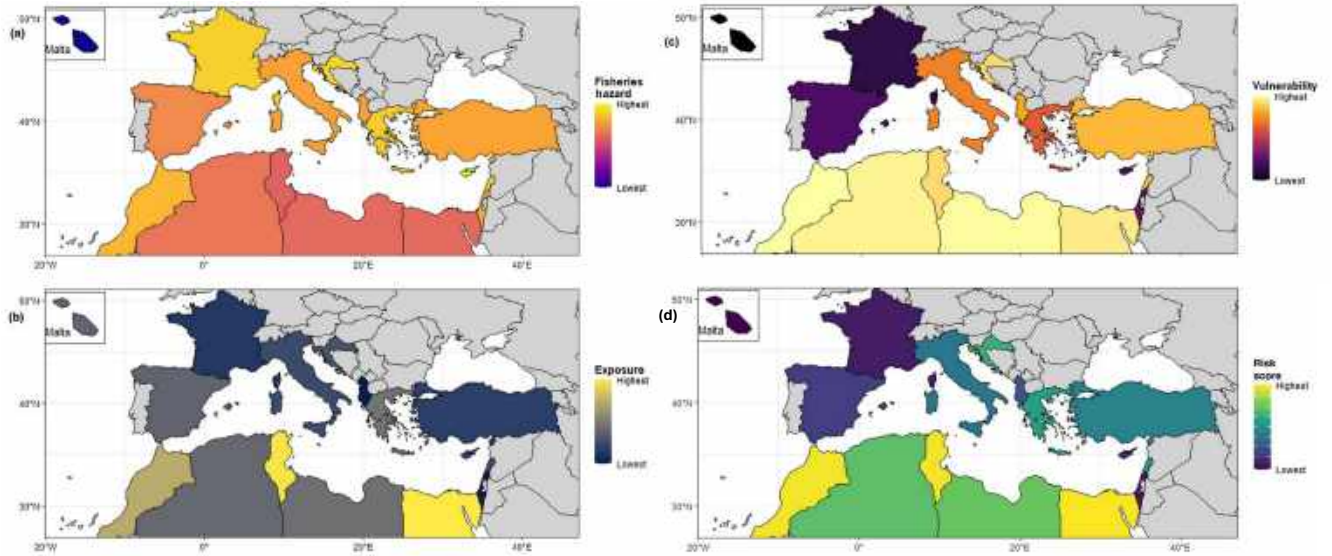


Figura 4. Adaptado de Pita et al. (2021). Distribución geográfica de los 16 países mediterráneos estudiados para los tres componentes del riesgo pesquero: (a) peligro pesquero, (b) exposición y (c) vulnerabilidad. La combinación de los tres componentes resultó en las (d) puntuaciones de riesgo pesquero entre los 16 países estudiados bajo el escenario de cambio climático RCP8.5 para 2050.

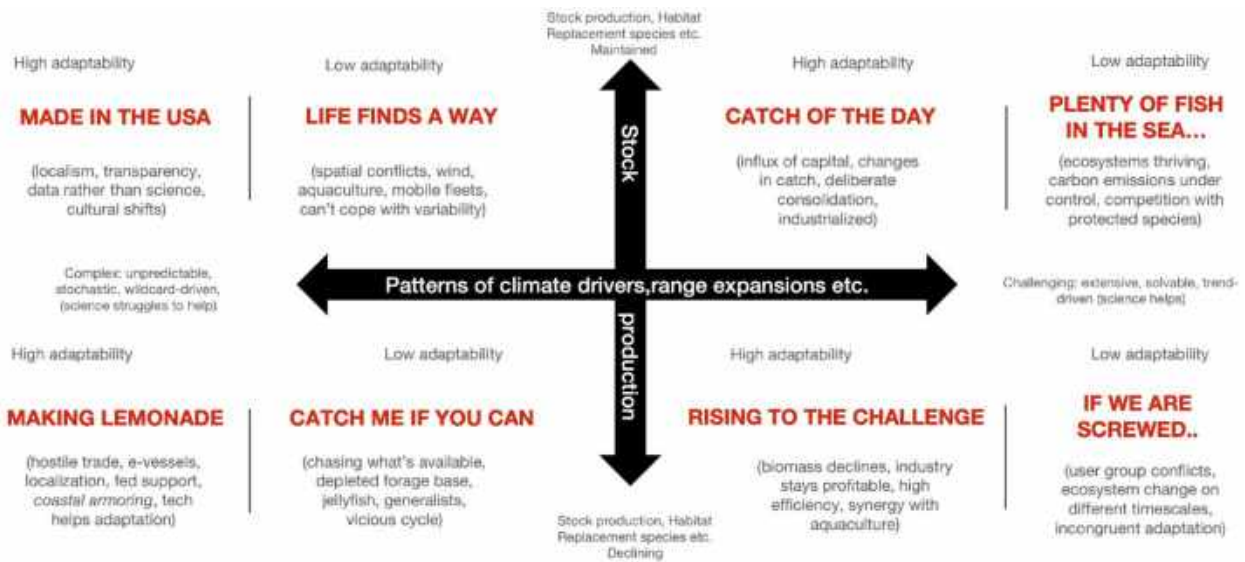


Figura 5. Los escenarios creados durante el taller de construcción de escenarios a partir de tres ejes de incertidumbre: salud de la productividad de los stocks, previsibilidad del cambio en las condiciones oceánicas y la distribución de las especies, y adaptabilidad de la industria, de MAFMC (2023).

Implementation method	Data collection instrument	Approach	Type of information	Advantage	Disadvantage
Online	Survey-questionnaire	Structured approach (mostly quantitative data)	Population based information	Knowledge of the differences in the likely responses between stakeholders	<ul style="list-style-type: none"> • Challenging to get good response rates (and representative sample). • Need to access appropriate database or social media platform to implement • Little potential for qualitative information to be gathered.
Phone or face-to-face	Interview or questionnaire	Structured or semi-structured	Key informants can be targeted (thus limiting the number of responses required)	Higher chance of survey completion by participants	<ul style="list-style-type: none"> • Selecting and getting participation from key informants can be challenging
Expert elicitation	Survey exercise, adapted with each round	Delphi method	Several rounds of survey are implemented (i.e. to a group of experts). The anonymous responses are aggregated and shared with the group after each round - and discussed	Consensus outcome or classes of actions	<ul style="list-style-type: none"> • No information on the differences between stakeholder groups
Workshop	Survey-questionnaire (conducted by participants) and/or clarification or validation exercise of assessment results	Interpretive and semi-structured	Key stakeholder responses	<p>Higher chance of survey completion by participants</p> <p>Higher likelihood of trust in results and adoption</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Small sample • Quiet voices can be missed

Figura 6. Tomada de la Tabla 4-5 en Fulton et al. 2020, esta tabla muestra los diferentes métodos de implementación para evaluar el riesgo pesquero.

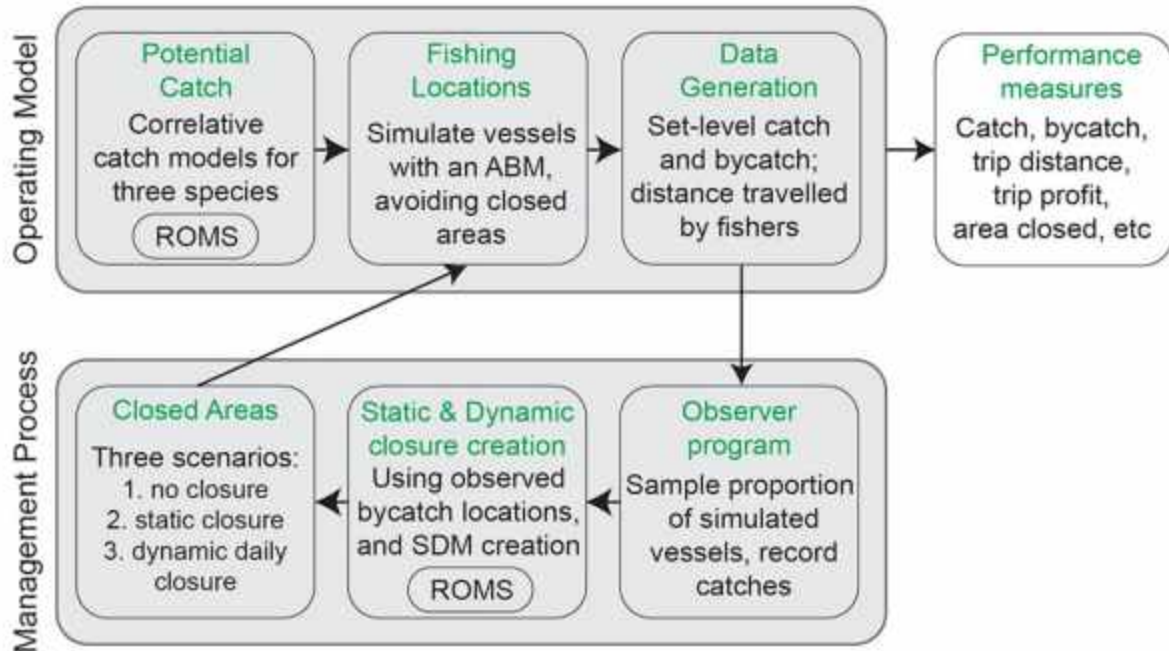


Figura 7. Tomada de la Figura 3 en Kaplan et al. (2021), muestra la estructura de la EEO de pez espada que evalúa estrategias de cierre espacial utilizando modelos basados en agentes (MBA), modelos de distribución de especies (MDE) y un sistema de modelado oceánico regional (ROMS).

7. REFERENCIAS

- A'mar, Z. T., A. E. Punt y M. W. Dorn. 2009. The evaluation of two management strategies for the Gulf of Alaska walleye pollock fishery under climate change. *ICES Journal of Marine Science* 66:1614-1632.
- Adams, C. F. 2018. Butterfish 2017 stock assessment update. Page 31. US Dept Commer, Northeast Fish Sci Cent.
- Baum, J. K. y B. Worm. 2009. Cascading top-down effects of changing oceanic predator abundances. *Journal of Animal Ecology* 78:699-714.
- Borggaard, D., D. M. Dick, J. Star, M. Alexander, M. Bernier, M. Collins, K. B. Damon-Randall, R. Dudley, R. Griffis, S. Hayes, M. Johnson, D. Kircheis, J. Kocik, B. Letcher, N. Mantua, W. E. Morrison, K. Nislow, V. Saba, R. L. Saunders, T. Sheehan y M. D. Staudinger. 2019. Atlantic Salmon Scenario Planning Pilot Report. Greater Atlantic Region Policy Series [19-05]. NOAA Fisheries Greater Atlantic Regional Fisheries Office. 89.
- Bouyoucos, I. A., C. D. Suski, J. W. Mandelman y E. J. Brooks. 2017. The energetic, physiological, and behavioral response of lemon sharks (*Negaprion brevirostris*) to simulated longline capture. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A* 207:65-72.
- Boyce, D. G., N. Shackell, P. Greyson y B. Greenan. 2023. A prospective framework to support climate-adaptive fisheries in Canada. 2371-1671.
- Boyce, D. G., D. P. Tittensor, C. Garilao, S. Henson, K. Kaschner, K. Kesner-Reyes, A. Pigot, R. B. Reyes Jr, G. Reygondeau y K. E. Schleit. 2022. A climate risk index for marine life. *Nature Climate Change* 12:854-862.

Braun, C. D., N. Lezama-Ochoa, N. Farchadi, M. C. Arostegui, M. Alexander, A. Allyn, S. J. Bograd, S. Brodie, D. P. Crear y T. H. Curtis. 2023. Widespread habitat loss and redistribution of marine top predators in a changing ocean. *Science Advances* 9:eadi2718.

Bromhead, D., V. Scholey, S. Nicol, D. Margulies, J. Wexler, M. Stein, S. Hoyle, C. Lennert-Cody, J. Williamson y J. Havenhand. 2015. The potential impact of ocean acidification upon eggs and larvae of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*). *Deep Sea Research Part II* 113:268-279.

Carroll, G., J. G. Eurich, K. D. Sherman, R. Glazer, M. T. Braynen, K. A. Callwood, A. Castañeda, C. Dahlgren, K. A. Karr y K. M. Kleisner. 2023. A participatory climate vulnerability assessment for recreational tidal flats fisheries in Belize and The Bahamas. *Frontiers in Marine Science* 10:1177715.

Champion, C., S. Brodie y M. A. Coleman. 2021. Climate-driven range shifts are rapid yet variable among recreationally important coastal-pelagic fishes. *Frontiers in Marine Science* 8:156.

Champion, C., J. R. Lawson, J. Pardoe, D. O. Cruz, A. M. Fowler, F. Jaine, H. T. Schilling y M. A. Coleman. 2023. Multi-criteria analysis for rapid vulnerability assessment of marine species to climate change. *Climatic Change* 176:99.

Cox, S. P., T. E. Essington, J. F. Kitchell, S. J. Martell, C. J. Walters, C. Boggs e I. Kaplan. 2002. Reconstructing ecosystem dynamics in the central Pacific Ocean, 1952-1998. II. A preliminary assessment of the trophic impacts of fishing and effects on tuna dynamics. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 59:1736-1747.

Crear, D. P., R. W. Brill, L. M. Averilla, S. C. Meakem y K. C. Weng. 2020a. In the face of climate change and exhaustive exercise: the physiological response of an important recreational fish species. *Royal Society Open Science* 7:1-13.

Crear, D. P., R. W. Brill, P. G. Bushnell, R. J. Latour, G. D. Schwieterman, R. M. Steffen y K. C. Weng. 2019. The impacts of warming and hypoxia on the performance of an obligate ram ventilator. *Conservation Physiology* 7:1-14.

Crear, D. P., T. H. Curtis, S. J. Durkee y J. K. Carlson. 2021. Highly migratory species predictive spatial modeling (PRiSM). *Marine Biology* 168:1-17.

Crear, D. P., B. E. Watkins, M. A. Friedrichs, P. St-Laurent y K. C. Weng. 2020b. Estimating Shifts in Phenology and Habitat Use of Cobia in Chesapeake Bay Under Climate Change. *Frontiers in Marine Science* 7:943.

Crear, D. P., B. E. Watkins, V. S. Saba, J. E. Graves, D. R. Jensen, A. J. Hobday y K. C. Weng. 2020c. Contemporary and future distributions of cobia, *Rachycentron canadum*. *Diversity and Distributions* 26:1002-1015.

Crozier, L. G., M. M. McClure, T. Beechie, S. J. Bograd, D. A. Boughton, M. Carr, T. D. Cooney, J. B. Dunham, C. M. Greene y M. A. Haltuch. 2019. Climate vulnerability assessment for Pacific salmon and steelhead in the California Current Large Marine Ecosystem. *PLoS ONE* 14:e0217711.

Dell'Apa, A., R. Boenish, R. Fujita y K. Kleisner. 2023. Effects of climate change and variability on large pelagic fish in the Northwest Atlantic Ocean. *Frontiers in Marine Science* 10:1206911.

Farchadi, N., H. Welch, C. D. Braun, A. J. Allyn, S. J. Bograd, S. Brodie, E. L. Hazen, A. Kerney, N. Lezama-Ochoa y K. E. Mills. 2024. Marine heatwaves redistribute pelagic fishing fleets. *Fish and Fisheries*.

Farr, E. R., M. R. Johnson, M. W. Nelson, J. A. Hare, W. E. Morrison, M. D. Lettrich, B. Vogt, C. Meaney, U. A. Howson y P. J. Auster. 2021. An assessment of marine, estuarine, and riverine habitat vulnerability to climate change in the Northeast US. *PLoS ONE* 16:e0260654.

Feng, Y., M. A. M. Friedrichs, J. Wilkin, H. Tian, Q. Yang, E. E. Hofmann, J. D. Wiggert y R. R. Hood. 2015. Chesapeake Bay nitrogen fluxes derived from a land-estuarine ocean biogeochemical modeling system. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 120:1666-1695.

Frommel, A. Y., D. Margulies, J. B. Wexler, M. S. Stein, V. P. Scholey, J. E. Williamson, D. Bromhead, S. Nicol y J. Havenhand. 2016. Ocean acidification has lethal and sub-lethal effects on larval development of yellowfin tuna, *Thunnus albacares*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 482:18-24.

Fu, C., R. I. Perry, Y.-J. Shin, J. Schweigert y H. Liu. 2013. An ecosystem modelling framework for incorporating climate regime shifts into fisheries management. *Progress in Oceanography* 115:53-64.

Fulton, E., E. van Putten, L. Dutra, J. Melbourne-Thomas, E. Ogier, L. Thomas, R. Murphy, I. Butler, D. Ghebregabhier, A. Hobday y N. Rayns. 2020. *Adaptation of fisheries management to climate change Handbook*. CSIRO, Australia.

Gammage, L. C. y A. Jarre. 2021. Scenario-Based approaches to change management in fisheries. *Frontiers in Marine Science* 8:600150.

Giddens, J., D. R. Kobayashi, G. N. Mukai, J. Asher, C. Birkeland, M. Fitchett, M. A. Hixon, M. Hutchinson, B. C. Mundy y J. M. O'Malley. 2022. Assessing the vulnerability of marine life to climate change in the Pacific Islands region. *PLoS ONE* 17:e0270930.

Griffiths, S. P., V. Allain, S. D. Hoyle, T. A. Lawson y S. J. Nicol. 2019. Just a FAD? Ecosystem impacts of tuna purse-seine fishing associated with fish aggregating devices in the western Pacific. *Fisheries Oceanography* 28:94-112.

Griffiths, S. P., R. J. Olson y G. M. Watters. 2013. Complex wasp-waist regulation of pelagic ecosystems in the Pacific Ocean. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 23:459-475.

Griffiths, S. P., B. P. Wallace, V. Cáceres, L. H. Rodríguez, J. Lopez, M. Abrego, J. Alfaro-Shigueto, S. Andraka, M. J. Brito y L. C. Bustos. 2024. Vulnerability of the Critically Endangered leatherback turtle to fisheries bycatch in the eastern Pacific Ocean. II. Assessment of mitigation measures. *Endangered Species Research* 53:295-326.

Haltuch, M. A., Z. T. A'mar, N. A. Bond y J. L. Valero. 2019. Assessing the effects of climate change on US West Coast sablefish productivity and on the performance of alternative management strategies. *ICES Journal of Marine Science* 76:1524-1542.

Hare, J. A., W. E. Morrison, M. W. Nelson, M. M. Stachura, E. J. Teeters, R. B. Griffis, M. A. Alexander, J. D. Scott, L. Alade y R. J. Bell. 2016. A vulnerability assessment of fish and invertebrates to climate change on the Northeast US Continental Shelf. *PLoS ONE* 11:e0146756.

Harper, S. J., J. M. Burt, L. K. Nelson, J. M. Runnebaum, A. Cullen, P. S. Levin, K. L. Hunter, J. McIsaac y N. C. Ban. 2023. Commercial fisher perceptions illuminate a need for social justice considerations in navigating climate change impacts on fisheries systems. *Ecology and Society* 28.

Hazen, E. L., S. Jorgensen, R. R. Rykaczewski, S. J. Bograd, D. G. Foley, I. D. Jonsen, S. A. Shaffer, J. P. Dunne, D. P. Costa y L. B. Crowder. 2013. Predicted habitat shifts of Pacific top predators in a changing climate. *Nature Climate Change* 3:234.

Hazen, E. L., K. L. Scales, S. M. Maxwell, D. K. Briscoe, H. Welch, S. J. Bograd, H. Bailey, S. R. Benson, T. Eguchi y H. Dewar. 2018. A dynamic ocean management tool to reduce bycatch and support sustainable fisheries. *Science Advances* 4:eaar3001.

Heuer, R. M., Y. M. Wang, C. Pasparakis, V. Scholey, D. Margulies y M. Grosell. 2020. Effects of Elevated CO₂ on Yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) Early Life Stage Respiration and Ammonia Excretion. *The FASEB Journal* 34:1-1.

Hinton, M. G. 1996. Standardizing catch and effort statistics using physiological, ecological, or behavioral constraints, and environmental data, with applications to blue marlin and swordfish of the Pacific Ocean. University of California, San Diego.

IPCC. 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland.

Johnson, J. E. y D. J. Welch. 2009. Marine fisheries management in a changing climate: a review of vulnerability and future options. *Reviews in Fisheries Science* 18:106-124.

Kaplan, I. C., S. K. Gaichas, C. C. Stawitz, P. D. Lynch, K. N. Marshall, J. J. Deroba, M. Masi, J. K. Brodziak, K. Y. Aydin y K. Holsman. 2021. Management strategy evaluation: allowing the light on the hill to illuminate more than one species. *Frontiers in Marine Science* 8:624355.

Kjesbu, O. S., S. Sundby, A. B. Sandø, M. Alix, S. S. Hjøllø, M. Tiedemann, M. Skern-Mauritzen, C. Junge, M. Fosshem y C. Thorsen Broms. 2022. Highly mixed impacts of near-future climate change on stock productivity proxies in the North East Atlantic. *Fish and Fisheries* 23:601-615.

Lee, H.-H., K. R. Piner, M. N. Maunder, I. G. Taylor y R. D. Methot Jr. 2017. Evaluation of alternative modelling approaches to account for spatial effects due to age-based movement. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 74:1832-1844.

Lehodey, P., I. Senina y R. Murtugudde. 2008. A spatial ecosystem and populations dynamics model (SEAPODYM). *Progress in Oceanography* 78:304-318.

Lellouche, J.-M., E. Greiner, O. Le Galloudec, G. Garric, C. Regnier, M. Drevillon, M. Benkiran, C.-E. Testut, R. Bourdalle-Badie y F. Gasparin. 2018. Recent updates to the Copernicus Marine Service global ocean monitoring and forecasting real-time 1/12° high-resolution system. *Ocean Science* 14:1093-1126.

Lettrich, M. D., M. J. Asaro, D. L. Borggaard, D. M. Dick, R. B. Griffis, J. A. Litz, C. D. Orphanides, D. L. Palka, M. S. Soldevilla y B. Balmer. 2023. Vulnerability to climate change of United States marine mammal stocks in the western North Atlantic, Gulf of Mexico, and Caribbean. *PLoS ONE* 18:e0290643.

Lezama-Ochoa, N., S. Brodie, H. Welch, M. G. Jacox, M. P. Buil, J. Fiechter, M. Cimino, B. Muhling, H. Dewar y E. A. Becker. 2023. Divergent responses of highly migratory species to climate change in the California Current.

Li, Y., M. Sun, K. M. Kleisner, K. E. Mills y Y. Chen. 2023. A global synthesis of climate vulnerability assessments on marine fisheries: methods, scales and knowledge co-production. *Global Change Biology*.

Lopez, J., S. Griffiths, B. P. Wallace, V. Cáceres, L. H. Rodríguez, M. Abrego, J. Alfaro-Shigueto, S. Andraka, M. J. Brito y L. C. Bustos. 2024. Vulnerability of the Critically Endangered leatherback turtle to fisheries bycatch in the eastern Pacific Ocean. I. A machine-learning species distribution model. *Endangered Species Research* 53:271-293.

Loughran, T. C., J. L. Cudney, D. P. Crear, L. M. Crawford, B. J. Curtis, E. M. Gutierrez, E. R. Hoffmayer, C. T. McCandless, E. S. Orbesen y B. A. Keller. 2025. A climate vulnerability assessment for US highly migratory fishes in the Atlantic Ocean. *PLOS Climate* 4:e0000530.

Lynch, P. D., R. D. Methot y J. S. Link. 2018. Implementing a Next Generation Stock Assessment Enterprise. NOAA Tech Memo NMFS-F/SPO-183.

MAFMC. 2023. East Coast Climate Change Scenario Planning. Mid-Atlantic Fisheries Management Council, Dover, DE.

Margulies, D., V. P. Scholey, J. B. Wexler y M. S. Stein. 2016. Research on the reproductive biology and early life history of yellowfin tuna *Thunnus albacares* in Panama. Pages 77-114 in D. D. Benetti, G. J. Partridge y A. Buentello, eds. *Advances in tuna aquaculture*. Elsevier.

Maunder, M. N. y R. B. Deriso. 2003. Estimation of recruitment in catch-at-age models. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 60:1204-1216.

Maunder, M. N. y M. G. Hinton. 2006. Estimating relative abundance from catch and effort data, using neural networks.

Maunder, M. N., M. G. Hinton, K. A. Bigelow y A. D. Langley. 2006. Developing indices of abundance using habitat data in a statistical framework. *Bulletin of Marine Science* 79:545-559.

Maunder, M. N. y G. M. Watters. 2003. A general framework for integrating environmental time series into stock assessment models.

McClure, M. M., M. A. Haltuch, E. Willis-Norton, D. D. Huff, E. L. Hazen, L. G. Crozier, M. G. Jacox, M. W. Nelson, K. S. Andrews y L. A. Barnett. 2023. Vulnerability to climate change of managed stocks in the California Current large marine ecosystem. *Frontiers in Marine Science*.

McHenry, J., H. Welch, S. E. Lester y V. Saba. 2019. Projecting marine species range shifts from only temperature can mask climate vulnerability. *Global Change Biology* 25:4208-4221.

Methot Jr, R. D. y C. R. Wetzel. 2013. Stock synthesis: a biological and statistical framework for fish stock assessment and fishery management. *Fisheries Research* 142:86-99.

Morley, J. W., R. L. Selden, R. J. Latour, T. L. Frölicher, R. J. Seagraves y M. L. Pinsky. 2018. Projecting shifts in thermal habitat for 686 species on the North American continental shelf. *PLoS ONE* 13:1-28.

NEFSC. 2015. 60th Northeast Regional Stock Assessment Workshop (60th SAW) Assessment Report. US Dept Commerce, Northeast Fish Sci Cent.

Olson, R. J. y G. M. Watters. 2003. A model of the pelagic ecosystem in the eastern tropical Pacific Ocean.

Pepin, P., J. King, C. Holt, H. Gurney-Smith, N. Shackell, K. Hedges y A. Bundy. 2022. Incorporating knowledge of changes in climatic, oceanographic and ecological conditions in Canadian stock assessments. *Fish and Fisheries* 23:1332-1346.

Peterson, G. D., G. S. Cumming y S. R. Carpenter. 2003. Scenario planning: a tool for conservation in an uncertain world. *Conservation Biology* 17:358-366.

Pita, I., D. Mouillot, F. Moullec y Y. J. Shin. 2021. Contrasted patterns in climate change risk for Mediterranean fisheries. *Global Change Biology* 27:5920-5933.

Polovina, J. J., M. Abecassis, E. A. Howell y P. Woodworth. 2009. Increases in the relative abundance of mid-trophic level fishes concurrent with declines in apex predators in the subtropical North Pacific, 1996-2006. *Fishery Bulletin* 107.

Punt, A. E., T. A'mar, N. A. Bond, D. S. Butterworth, C. L. de Moor, J. A. De Oliveira, M. A. Haltuch, A. B. Hollowed y C. Szuwalski. 2014. Fisheries management under climate and environmental uncertainty: control rules and performance simulation. *ICES Journal of Marine Science* 71:2208-2220.

Punt, A. E., D. S. Butterworth, C. L. de Moor, J. A. De Oliveira y M. Haddon. 2016. Management strategy evaluation: best practices. *Fish and Fisheries* 17:303-334.

Punt, A. E., F. Trinnie, T. I. Walker, R. McGarvey, J. Feenstra, A. Linnane y K. Hartmann. 2013. The performance of a management procedure for rock lobsters, *Jasus edwardsii*, off western Victoria, Australia in the face of non-stationary dynamics. *Fisheries Research* 137:116-128.

Rovellini, A., A. E. Punt, M. D. Bryan, I. C. Kaplan, M. W. Dorn, K. Aydin, E. A. Fulton, B. Alglave, M. R. Baker y G. Carroll. 2025. Linking climate stressors to ecological processes in ecosystem models, with a case study from the Gulf of Alaska. *ICES Journal of Marine Science* 82:fsae002.

Saba, V. S., S. M. Griffies, W. G. Anderson, M. Winton, M. A. Alexander, T. L. Delworth, J. A. Hare, M. J. Harrison, A. Rosati y G. A. Vecchi. 2016. Enhanced warming of the northwest Atlantic Ocean under climate change. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 121:118-132.

Schwartz, P. 1996. *The art of the long view: planning for the future in an uncertain world*. Currency.

Seara, T., R. Pollnac y K. Jakubowski. 2020. Fishers' perceptions of environmental and climate change in Puerto Rico: implications for adaptation and sustainability. Pages 15-34 in M. Welch-Devine, B. J. Burke y A. Sourdril, eds. *Changing Climate, Changing Worlds*. Springer Nature, Switzerland.

SEDAR. 2019. SEDAR 61 - Gulf of Mexico Red Grouper Stock Assessment Report. Page 285. SEDAR, North Charleston.

Slesinger, E., H. du Pontavice, B. Seibel, V. S. Saba, J. Kohut y G. K. Saba. 2024. Climate-induced reduction in metabolically suitable habitat for US northeast shelf marine species. *PLOS Climate* 3:e0000357.

Smith, J. A., D. Tommasi, H. Welch, E. L. Hazen, J. Sweeney, S. Brodie, B. Muhling, S. M. Stohs y M. G. Jacox. 2021. Comparing dynamic and static time-area closures for bycatch mitigation. *Frontiers in Marine Science* 8:630607.

Spencer, P. D., A. B. Hollowed, M. F. Sigler, A. J. Hermann y M. W. Nelson. 2019. Trait-based climate vulnerability assessments in data-rich systems: An application to eastern Bering Sea fish and invertebrate stocks. *Global Change Biology* 25:3954-3971.

Tommasi, D., C. A. Stock, K. Pegion, G. A. Vecchi, R. D. Methot, M. A. Alexander y D. M. Checkley Jr. 2017. Improved management of small pelagic fisheries through seasonal climate prediction. *Ecological Applications* 27:378-388.

Wang, J., W. Yu, X. Chen y Y. Chen. 2016. Stock assessment for the western winter-spring cohort of neon flying squid using environmentally dependent surplus production models. *Scientia Marina* 80:69-78.

Welch, H., B. M. Holycross, A. A. Cluett, M. G. Jacox, C. E. Braby, M. W. Callahan, J. A. Cullen, N. Farchadi, R. Seary y J. T. Watson. 2025. Fishing fleets as ecosystem sentinels. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 122:e2516308122.

Wexler, J. B., D. Margulies y V. P. Scholey. 2011. Temperature and dissolved oxygen requirements for survival of yellowfin tuna, *Thunnus albacares*, larvae. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 404:63-72.

Williams, S. E., L. P. Shoo, J. L. Isaac, A. A. Hoffmann y G. Langham. 2008. Towards an integrated framework for assessing the vulnerability of species to climate change. *PLoS Biology* 6:e325.

Woodworth-Jefcoats, P. A., J. J. Polovina, E. A. Howell y J. L. Blanchard. 2015. Two takes on the ecosystem impacts of climate change and fishing: Comparing a size-based and a species-based ecosystem model in the central North Pacific. *Progress in Oceanography* 138:533-545.