

COMISIÓN INTERAMERICANA DEL ATÚN TROPICAL

COMITÉ CIENTÍFICO ASESOR

15ª REUNIÓN

La Jolla, California (EE. UU.)

10-14 de junio de 2024

DOCUMENTO SAC-15-12

UN PLAN DE TRABAJO SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA CIAT

Dan Crear, Jon López, Leanne Fuller y Alexandre Aires-da-Silva

ÍNDICE

Resumen ejecutivo.....	1
1. Antecedentes	2
1.1 Objetivos	3
2. Investigación actual de la CIAT relacionada con el cambio climático.....	3
2.1 Proyectos sobre cambio climático	3
2.2 Otros proyectos de investigación relevantes.....	3
3. Herramientas desarrolladas para PESQUERÍAS resilientes al clima	4
3.1 Datos oceanográficos y climáticos	4
3.2 Modelos de distribución de especies.....	6
3.3 Indicadores.....	7
3.4 Evaluación de vulnerabilidad climática	8
3.5 Planificación de escenarios de cambio climático.....	10
3.6 Evaluación de estrategias de ordenación	12
3.6.1 Integración de la evaluación de estrategias de ordenación y el cambio climático	12
3.7 Evaluaciones de poblaciones informadas por el clima	13
3.8 Sistemas de ordenación flexibles.....	16
4. Marcos pesqueros resilientes al clima	17
4.1 Ciclo de conservación climáticamente inteligente	18
4.2 Marco para la evaluación integral de poblaciones y hábitats (FISHE)	18
4.3 Marco de adaptación al cambio climático para pesquerías (CAFF).....	19
4.4 Manual de adaptación al cambio climático	19
4.5 Marco de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).....	20
5. Propuesta de plan de trabajo sobre el cambio climático de la CIAT	21
6. Tablas	24
7. Figuras	25
8. Referencias.....	35

RESUMEN EJECUTIVO

En las últimas décadas, las investigaciones han comenzado a mostrar los impactos directos e indirectos del cambio climático sobre las especies marinas, los ecosistemas y las comunidades pesqueras. En reconocimiento de estos impactos sobre las pesquerías y la conservación y sostenibilidad de las especies objetivo y no objetivo abarcadas por la [Convención de Antigua](#), la CIAT adoptó una resolución sobre el

cambio climático en 2023 ([resolución C-23-10](#)). El presente documento resume el trabajo actual que el personal de la CIAT está realizando para comprender, monitorear, y prepararse para los efectos del cambio climático en el Océano Pacífico oriental (OPO), y revisa las muchas herramientas y marcos desarrollados por varios países y organizaciones internacionales para comprender y tomar en cuenta el cambio climático en la ordenación y la ciencia pesquera. Esta revisión se utiliza después para proponer un plan de trabajo que promueva pesquerías atuneras resilientes al clima en el OPO. Hasta la fecha, solo dos proyectos del [PCE](#) han investigado los impactos del cambio climático, mientras que un pequeño número de otros proyectos se consideran relevantes. Con base en el poco trabajo realizado sobre cambio climático en la CIAT, se presenta una oportunidad para desarrollar un plan de trabajo que guíe a la Comisión a través de varias fases, componentes y actividades requeridas para promover pesquerías resilientes al clima. Las fases propuestas son cinco: i) planificación, ii) decisión sobre el alcance y los objetivos, iii) desarrollo de un marco, iv) creación de herramientas, y v) aplicación de las herramientas y/o implementación de la ordenación, mientras que los tres componentes incluyen i) el marco, ii) las herramientas, y iii) las consideraciones de ordenación. El marco, un componente fundamental de todos los planes de trabajo sobre cambio climático revisados, es un conjunto de pasos que guían y apoyan las decisiones y acciones que conducirán a pesquerías preparadas para el cambio climático. En la revisión se destacan cinco marcos que están empezando a ser adoptados por diversos países y organizaciones. La mayoría de estos marcos son iterativos y siguen pasos comunes como la determinación del alcance, que consiste en identificar un objetivo de conservación (es decir, una especie, una pesquería, una comunidad), determinar el alcance geográfico y temporal, e identificar a las principales partes involucradas. Los pasos siguientes consisten en evaluar y comprender los impactos del cambio climático en el objetivo de conservación, desarrollar posibles herramientas que los gestores puedan utilizar para tener en cuenta estos impactos e implementar las mejores estrategias y tácticas que promuevan pesquerías resilientes al clima. Para lograr los pasos mencionados anteriormente, el personal de la CIAT, la Comisión y otras partes interesadas deberán desarrollar numerosas herramientas a través de múltiples talleres, reuniones y proyectos participativos. Afortunadamente, otras organizaciones ya han desarrollado herramientas y se describen en la revisión como ejemplos para la CIAT. La revisión abarca una serie de herramientas y estudios de caso, desde modelos de distribución de especies y evaluaciones de vulnerabilidad climática hasta la integración del cambio climático en la evaluación de estrategias de ordenación y la gestión espacial. Estas herramientas conducirán finalmente al tercer componente y última fase del plan de trabajo, en la que se introducen consideraciones de ordenación y se implementan acciones de ordenación. Como se ilustra en este plan de trabajo, es probable que el calendario se extienda más allá de 2028 para dar cabida a futuras medidas de ordenación que tengan en cuenta la rápida evolución del clima. Tomando todo lo anterior en consideración, este documento describe un plan de trabajo desarrollado por el personal de la CIAT para promover pesquerías resilientes al clima para la CIAT.

1. ANTECEDENTES

En la 101ª reunión anual en Victoria, B.C., Canadá en agosto de 2023, la CIAT adoptó una resolución sobre el cambio climático ([resolución C-23-10](#)). La resolución reconoce los impactos que el cambio climático está teniendo en las especies objetivo y no objetivo, así como en las pesquerías, y los efectos potenciales que estos impactos pueden tener en la conservación y sostenibilidad a largo plazo de las poblaciones de peces abarcadas por la [Convención de Antigua](#). La resolución establece que el Grupo de Trabajo sobre Ecosistema y Captura Incidental (GTECI), el Comité Científico Asesor (CCA) y la Comisión incluirán el cambio climático como un punto recurrente de la agenda en sus respectivas reuniones anuales y, en general, *"resaltarán y examinarán la mejor información científica disponible sobre las relaciones entre el cambio climático, las poblaciones objetivo, las poblaciones no objetivo y las especies pertenecientes al mismo ecosistema que las poblaciones objetivo o asociadas a las mismas"*. Como primer paso para abordar esta resolución, el personal científico de la CIAT se ha propuesto elaborar un plan de trabajo para

evaluar y mitigar mejor estos efectos. Aunque los impactos climáticos están actualmente incluidos en el plan científico estratégico previo que fue extendido hasta 2024 (PCE, [IATTC-93-06a](#), ver principalmente el tema 5 "*Interacciones entre el medio ambiente, el ecosistema, y la pesca*"), siguiendo la resolución, el personal planea incorporar esfuerzos adicionales para comprender, monitorear, y mitigar los impactos en la próxima edición del PCE quinquenal. El cambio climático es una preocupación para muchas organizaciones, y por lo tanto, la CIAT se une a las otras organizaciones regionales de ordenación pesquera del atún (OROP atuneras), incluyendo la Comisión de Pesca del Pacífico Occidental y Central (WCPFC), la Comisión Internacional para la Conservación del Atún Atlántico (CICAA), y la Comisión del Atún para el Océano Índico (CAOI), que han desarrollado resoluciones ([resolución 2019-01](#), [resolución 22-13](#), [Resolución 22/01](#), respectivamente) para prepararse para los impactos del cambio climático en sus pesquerías.

1.1 Objetivos

Ante la adopción de la resolución de la CIAT sobre el cambio climático, los objetivos de este documento son:

1. Resumir el trabajo actual que la CIAT está llevando a cabo para comprender, monitorear y prepararse para los efectos del cambio climático en el Océano Pacífico oriental (OPO);
2. Revisar y destacar diversas herramientas y marcos que otros países y organizaciones internacionales han desarrollado para promover pesquerías resilientes al clima; y
3. Utilizar esta revisión para proponer un plan de trabajo sobre el cambio climático para consideración de la CIAT.

Este plan de trabajo permitirá a la CIAT y a su personal científico comprender mejor, monitorear, tomar en cuenta, mitigar, y prepararse para los impactos que el cambio climático pueda tener sobre las pesquerías, las especies objetivo, las especies no objetivo, y el ecosistema del OPO en general.

2. INVESTIGACIÓN ACTUAL DE LA CIAT RELACIONADA CON EL CAMBIO CLIMÁTICO

2.1 Proyectos sobre cambio climático

Al igual que en muchas otras OROP, en la CIAT se han realizado pocos trabajos centrados en los efectos del cambio climático. Actualmente hay dos proyectos en el [PCE](#) bajo la Meta N (mejorar los conocimientos de las interacciones entre impulsores ambientales, el clima, y la pesca), que incorporan explícitamente el cambio climático en los títulos de sus proyectos (ver [SAC-14-01](#)). El Proyecto N.2.a establece que el personal científico debe desarrollar modelos para comprender los efectos que el cambio climático puede tener en las etapas de vida antes del reclutamiento de los atunes tropicales, mientras que el Proyecto N.2.b apoya las pesquerías sostenible y preparadas para el cambio climático utilizando datos ambientales ([SAC-14-01](#)).

Para abordar los objetivos del Proyecto N.2.a, se han realizado estudios experimentales en el Laboratorio de Achotines de la CIAT desde 2004 hasta la actualidad. Se ha probado la variabilidad del cambio climático en investigaciones experimentales replicadas y se han estimado los efectos sobre el crecimiento, la supervivencia y la fisiología de las primeras etapas de vida del YFT. Estas investigaciones han estudiado los efectos del calentamiento de los océanos, la acidificación y la anoxia en las etapas de huevo y larva del YFT ([SAC-15 INF-P](#)), y estos estudios han dado lugar a [ocho publicaciones revisadas por pares](#).

2.2 Otros proyectos de investigación relevantes

Otros trabajos, aunque no estén directamente relacionados con el cambio climático, pueden aprovecharse en futuras investigaciones sobre el cambio climático. En los últimos años, se han

desarrollado modelos de distribución de especies (MDE) para los tres atunes tropicales y especies de captura incidental como la tortuga laúd utilizando un conjunto de variables ambientales y datos de observadores de la pesquería de cerco (ver [SAC-10 INF-D](#)). Además de identificar los efectos de diversas condiciones ambientales sobre los atunes tropicales, los MDE se han utilizado para predecir la distribución diaria de las especies desde principios de la década de 2000 dentro del Área de la Convención. Similarmente, también se han desarrollado MDE para varias especies de captura incidental capturadas en el OPO para apoyar las evaluaciones de riesgos ecológicos (ERE; ver SAC-15 INF-E). Estos modelos pueden ser usados para comprender mejor cómo han cambiado las distribuciones a lo largo del tiempo o en respuesta a eventos ambientales específicos (por ejemplo, El Niño-Oscilación del Sur, ENOS) que afectan las capturas o hábitats de los atunes tropicales (por ejemplo, a través del asomeramiento o profundización de la termoclina, [Bayliff 1989](#)). Por último, los proyectos de marcado para comprender los desplazamientos, el comportamiento y la utilización del hábitat de los atunes tropicales han generado datos que pueden informar los MDE y las subsiguientes investigaciones ambientales (ver SAC-15 INF-E). Más adelante se discutirán otras aplicaciones de los MDE.

El personal de la CIAT ha provisto de manera general indicadores ecosistémicos en su documento *Consideraciones Ecosistémicas*, que se actualiza anualmente (por ejemplo, series de tiempo de capturas incidentales de especies no objetivo por grupo taxonómico: mamíferos marinos, tortugas marinas, tiburones, rayas, peces; índices ambientales: Índice de El Niño Oceánico, ONI, Oscilación Decadal del Pacífico, ODP; y más específicamente indicadores ecológicos resultantes del modelo de balance de masas Ecopath que en conjunto identifican cambios en la estructura del ecosistema del OPO) (ver [SAC-14-11](#)). Un plan de trabajo propuesto sobre el desarrollo de una ficha informativa sobre ecosistemas ("*EcoCard*") de indicadores ecosistémicos, climáticos y de captura incidental, complementario al plan de trabajo aquí presentado sobre el cambio climático, será presentado en el GTECI de este año (ver [EB-02-02](#)) como un medio para seguir apoyando los avances y la operatividad hacia enfoques ecosistémicos de la ordenación pesquera (EEOP). Este tipo de información puede rastrear cambios sencillos en el ecosistema a lo largo del tiempo, ya sea condiciones ambientales (por ejemplo, temperatura superficial del mar), esfuerzo de pesca (por ejemplo, número de lances) o capturas de especies objetivo y no objetivo (por ejemplo, captura total de atún aleta amarilla). En teoría, los indicadores pueden utilizarse para vincular una respuesta ecológica o pesquera a un cambio ambiental, que puede relacionarse con los impactos del cambio climático.

3. HERRAMIENTAS DESARROLLADAS PARA PESQUERÍAS RESILIENTES AL CLIMA

Las herramientas son instrumentos estratégicos o tácticos diseñados para respaldar las decisiones y medidas de ordenación pesquera. Son especialmente importantes porque se utilizan para ayudar a los científicos a monitorear el cambio y a los gestores de recursos a implementar las medidas necesarias para hacerles frente. Muchos países y organizaciones internacionales han desarrollado herramientas para ayudar a comprender y mitigar los impactos del cambio climático. A continuación se describen en detalle diversas herramientas.

3.1 Datos oceanográficos y climáticos

Los datos oceanográficos suelen recolectarse mediante mediciones *in situ* (por ejemplo, a bordo de buques y boyas) y detección remota. Con esta información, los oceanógrafos pueden modelar y predecir determinadas variables oceanográficas a distintas escalas espaciales y temporales. Los recientes avances informáticos han permitido aumentar la resolución espacial y temporal de nuestros océanos. Las áreas en las que se recolectan, asimilan y modelan datos con una mayor resolución espacial y temporal pueden producir a menudo una superficie de predicciones ambientales a escalas espaciales y temporales más finas.

Se puede producir una amplia gama de variables ambientales que van desde las estáticas (no cambian con el tiempo) a las dinámicas (cambian con el tiempo) y desde la superficie, la subsuperficie 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 más comunes son, por ejemplo, la temperatura superficial del mar (TSM), la salinidad superficial del mar, la altura superficial del mar (altimetría), la velocidad y dirección de la corriente superficial, la tensión del viento en la superficie y el rizo (medida de la rotación de la tensión del viento), la energía cinética de los remolinos (sustituto de la variabilidad a mesoescala debida a los remolinos), la clorofila (a menudo un sustituto de la producción primaria) y la turbidez. A partir de las variables anteriores pueden derivarse otras, como las intensidades, anomalías y desviación estándar de la TSM y la altura de la superficie del mar, que pueden ser sustitutos de los frentes. Algunas de las variables subsuperficiales son la profundidad de la capa mixta (profundidad de la mezcla superficial) y la temperatura del agua, la salinidad y las velocidades de las corrientes a distintos niveles de profundidad. Las variables subsuperficiales no están tan fácilmente disponibles debido a la falta de datos y de comprensión de las condiciones subsuperficiales, y a menudo requieren un procesamiento adicional de los datos superficiales. Por último, si se desarrollan modelos biogeoquímicos para regiones específicas, entonces se dispone de variables como el nitrato y el oxígeno disuelto; sin embargo, estos tipos de modelos tienen una resolución espaciotemporal muy alta y suelen estar disponibles en cuerpos de agua muy específicos y bien estudiados (por ejemplo, la Bahía de Chesapeake; Feng *et al.* (2015)). Muchas de estas variables están disponibles para diversos periodos históricos y contemporáneos. A menudo, un subconjunto de esas variables puede proyectarse hacia el futuro con base en proyecciones climáticas. Todas estas variables se han tenido en cuenta al discutir los impactos climáticos sobre los atunes y las especies afines, ya que afectan directamente la fisiología y el comportamiento de estas especies o influyen en sus presas, afectando en última instancia sus distribuciones (Hazen *et al.* 2013, Dell'Apa *et al.* 2023).

Existen muchos productos de datos oceanográficos a nivel mundial, pero el periodo temporal y la resolución espacial varían considerablemente. Un producto común utilizado para los datos oceanográficos contemporáneos es el reanálisis oceánico global (GLORYS, Servicio de Vigilancia Marina Copernicus; Lellouche *et al.* (2018)), que es un modelo oceánico global, informado por mediciones *in situ* y detección remota, de asimilación de datos, que produce resultados diarios sin huecos a $1/12^\circ$ (~ 9 km) de resolución horizontal y 50 niveles verticales. Para las proyecciones climáticas, hay muchos modelos climáticos del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fases 5 (CMIP5) y 6 (CMIP6) (IPCC 2023) que proporcionan las condiciones oceánicas para varios periodos de tiempo con una resolución horizontal de 1° . Por otro lado, el Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos (GFDL) de la NOAA desarrolló su 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 de Estados Unidos y proporciona los cambios mensuales esperados (deltas) en las condiciones oceánicas durante un periodo de 80 años (Saba *et al.* 2016). Desafortunadamente, los productos de alta resolución como CM2.6 no se han desarrollado para todas las regiones oceánicas. Hasta la fecha, el personal de la CIAT ha descargado muchas de las variables antes mencionadas para el OPO desde 1995 hasta 2023 con una resolución temporal a menudo diaria y una resolución espacial de $1/4^\circ$ o $1/12^\circ$.

Los productos de datos oceanográficos se utilizan en muchas herramientas de pesquerías resilientes al clima. En las secciones de herramientas que figuran a continuación, se destacarán las aplicaciones de los datos oceanográficos, ya que suelen ser una información necesaria a la hora de determinar los efectos del cambio climático en 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 medio ambiente y una especie determinada, así como para predecir la distribución de una especie en una extensión espacial y temporal específica. Los datos de las especies se obtienen de fuentes dependientes de la pesca (por ejemplo, programas de observadores o bitácoras) o de fuentes independientes de la pesca (por ejemplo, estudios o datos de marcado) y constan de información espacial (latitud y longitud) y fecha/hora. Para comprender la relación entre las condiciones ambientales y la presencia o abundancia de una especie, los datos oceanográficos —extraídos de un producto oceánico adecuado— se vinculan a los datos de la especie en función de su ubicación y fecha, y se desarrolla un modelo para estimar las relaciones. Una vez identificadas esas relaciones, se puede predecir espacialmente la distribución de la especie o la idoneidad del hábitat en un periodo de tiempo determinado. Por ejemplo, para predecir la distribución de una especie en el OPO para julio de 2023, es necesario extraer los datos oceanográficos para la misma área y periodo de tiempo de uno de los muchos productos oceánicos disponibles. Esos datos y las relaciones desarrolladas a partir del MDE luego se utilizan para predecir la distribución de la especie. En el contexto del cambio climático, los MDE se utilizan a menudo para examinar cómo pueden cambiar o no las distribuciones en respuesta a diversas condiciones del océano en el futuro.

Se han utilizado muchos tipos de MDE para comprender los efectos del cambio climático en la distribución de las especies marinas. Los MDE más comunes utilizan enfoques de modelado correlativo o regresivo. Esto incluye modelos semiparamétricos, como los modelos aditivos generalizados (MAG) y los modelos de aprendizaje automático, como los bosques aleatorios o los árboles de regresión reforzada (BRT). Estos modelos suelen utilizar datos de presencia/ausencia de especies y producen probabilidades de presencia. Por ejemplo, McHenry *et al.* (2019) utilizaron datos de estudios de arrastre de fondo independientes de la pesca y MAG para proyectar la probabilidad de presencia y, por lo tanto, el cambio en la distribución debido al cambio climático de 125 especies a lo largo de la plataforma noreste de Estados Unidos, mientras que Braun *et al.* (2023) utilizaron datos de pesca y BRT para proyectar los cambios en la distribución de la presencia de 12 especies altamente migratorias en el Océano Atlántico noroccidental y el Golfo de México debido al cambio climático. Por último, Lezama-Ochoa *et al.* (2023) aplicaron MDE de 10 especies altamente migratorias en la Corriente de California para proyectar cambios direccionales y de distribución bajo varios escenarios de cambio climático. Los cambios en la distribución de la abundancia relativa también pueden determinarse utilizando modelos vectoriales autorregresivos espaciotemporales (VAST) y delta-lognormales. Estos métodos pueden considerar datos de captura y asociaciones de hábitat para derivar abundancias relativas, lo que puede ser preferible para determinadas aplicaciones. Por ejemplo, el modelo delta-lognormal se utilizó junto con datos de estudios ecológicos a largo plazo para proyectar los cambios en el hábitat térmico de 686 especies debido al cambio climático a lo largo de la plataforma continental de Norteamérica (Morley *et al.* 2018). Para las especies en las que el conjunto de datos es solo de presencias (por ejemplo, datos de marcado), se pueden crear pseudoausencias y aleatorizarlas espacial y temporalmente para que los resultados del modelo sean informativos. Por ejemplo, Champion *et al.* (2021) desarrollaron 10,000 pseudoausencias para acompañar los datos de presencia de una base de datos de marcado de peces de pesca deportiva y desarrollaron un MAG para proyectar los cambios de distribución debido al cambio climático de cuatro peces pelágicos costeros de importancia recreativa en la costa este de Australia. Cuando se dispone de datos climáticos actuales y futuros en toda la columna de agua y se miden y archivan datos ambientales mientras la especie nada libremente, es posible determinar los cambios en la distribución de la especie en un hábitat tridimensional. Por ejemplo, se desarrolló un MDE con profundidad integrada para la cobia (*Rachycentron canadum*) a partir de datos de marcas archivadoras y modelos climáticos de alta resolución para evaluar los cambios en su distribución a lo largo de la costa este de Estados Unidos entre periodos de tiempo

contemporáneos y futuros. (Crear *et al.* 2020). Tal como se menciona en la Sección 2.2, el personal de la CIAT ha desarrollado inicialmente MDE para atunes tropicales ([SAC-10 INF-D](#)) y especies de captura incidental como las tortugas laúd ([BYC-11-01](#)) y se han predicho distribuciones de especies en varias escalas temporales históricas y contemporáneas.

Al igual que los MDE se basan en datos oceanográficos, muchas otras herramientas de pesquerías resilientes al clima se basan en los resultados de los MDE. A menudo, los resultados más útiles de un MDE son los mapas que muestran la distribución proyectada de las especies en determinadas condiciones oceánicas y las métricas asociadas que miden el cambio. A continuación se describe la integración de los MDE en otras herramientas.

3.3 Indicadores

Los indicadores permiten monitorear los cambios a lo largo del tiempo e, idealmente, tienen umbrales asociados que, a su vez, pueden activar una respuesta o una acción por parte de los responsables de políticas. Se han desarrollado indicadores para datos climáticos y ambientales, como el Índice de El Niño Oceánico (ONI), utilizado para monitorear los fenómenos ENOS o los cambios en la anomalía promedio de la TSM en un cuerpo de agua determinado. Se han creado indicadores ecológicos utilizando datos de captura y esfuerzo de pesca, modelos ecosistémicos o resultados de MDE, entre otros. 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 para una especie capturada a lo largo del tiempo. Los índices ecológicos pueden obtenerse a partir de modelos ecosistémicos (por ejemplo, Ecopath), e incluyen indicadores tróficos (por ejemplo, nivel trófico medio de la captura), índices de diversidad (por ejemplo, índice de Shannon) e indicadores de pesca en equilibrio (FIB) (ver, por ejemplo, [SAC-10-15](#)). También pueden seguirse indicadores socioeconómicos como el precio o los ingresos de la pesca comercial, que ayudan a determinar el objetivo de una especie específica. En la Tabla 2 del Documento [EB-02-02](#) se incluye una lista de indicadores calculados y presentados a las respectivas Comisiones o propuestos por los científicos en apoyo de las OROP atuneras. Los cambios en muchos de estos indicadores podrían estar asociados a cambios en el clima y, por lo tanto, el monitoreo de estos cambios a lo largo del tiempo sería importante para promover pesquerías preparadas para el cambio climático.

Una síntesis global de indicadores relacionados con el clima realizada sobre 65 estudios encontró 119 indicadores y cuantificó el tipo de información utilizada para desarrollar el indicador (por ejemplo, conocimientos locales y de expertos vs. datos científicos), la escala espacial del indicador (por ejemplo, mundial vs. nacional) y si el indicador tenía un enfoque ecológico, socioeconómico o socioecológico (Li *et al.* 2023). Este estudio identificó como principal obstáculo la brecha existente entre los países que disponen de recursos e insumos y los países que no disponen de los recursos pero necesitan con mayor urgencia herramientas de adaptación. A pesar de ello, los autores revelaron que se ha hecho un amplio uso de indicadores en la ordenación dinámica y la planificación de la adaptación tanto en contextos ecológicos como sociales. Los indicadores seguirán siendo útiles para las pesquerías resilientes al clima; sin embargo, es importante que quienes desarrollen los indicadores trabajen con los gestores y otras partes interesadas pertinentes que coordinan la respuesta o la acción ante el cambio para evitar un desfase. El personal de la CIAT ha reconocido la utilidad potencial de los indicadores para describir el estado de los ecosistemas. Por consiguiente, en la 2ª reunión del GTECI ([EB-02-02](#)) se presentará un plan de trabajo propuesto para crear una ficha informativa sobre ecosistemas basada en indicadores ("EcoCard") y una *Evaluación del estado de los ecosistemas* complementaria para el OPO, mediante la colaboración con partes interesadas (es decir, el GTECI de la CIAT, el CCA, y la Comisión) y expertos mundiales.

3.4 Evaluación de vulnerabilidad climática

Las evaluaciones de vulnerabilidad climática (CVA, por sus siglas en inglés) son una herramienta para identificar la vulnerabilidad relativa de una entidad u objetivo específico, ya sea una especie, el hábitat o 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 en función de sus diversos rasgos, y su capacidad de adaptación y resiliencia para hacer frente a ese cambio. (Williams *et al.* 2008, Johnson y Welch 2009, Hare *et al.* 2016). Las CVA pretenden ser un enfoque rápido que pueda informar a los investigadores y a los gestores sobre dónde priorizar sus recursos. El método para llevar a cabo una CVA ha adoptado muchas formas y a menudo recibe diferentes nombres (por ejemplo, Evaluación de Riesgos Climáticos), pero todos siguen el marco general de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación. A continuación se ofrecen ejemplos de CVA.

3.4.1 Especies y hábitats

El método desarrollado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de EE. UU. consta de dos componentes principales y se ha utilizado principalmente para evaluar la vulnerabilidad de especies o poblaciones al cambio climático (Hare *et al.* 2016, McClure *et al.* 2023). El primer componente es una evaluación de las sensibilidades biológicas de las especies y de su capacidad de adaptación (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 puede estar expuesta una especie en un periodo de tiempo determinado. La puntuación cualitativa de sensibilidad biológica se combina con la puntuación cuantitativa de exposición para obtener una clasificación global de vulnerabilidad (por ejemplo, baja, moderada, alta o muy alta) que puede compararse entre especies. Hasta la fecha, se han realizado CVA siguiendo este método en muchas regiones de Estados Unidos, incluido el gran ecosistema marino (GEM) de la plataforma del noreste (82 especies) (Hare *et al.* 2016), Atlántico sur (71 especies), Golfo de México (75 especies), Mar de Bering (36 especies) (Spencer *et al.* 2019), GEM de la Corriente de California (64 especies; Figura 1) (McClure *et al.* 2023) y las islas del Pacífico (83 especies) (Giddens *et al.* 2022). También se han desarrollado CVA para grupos específicos de especies como el salmón del Pacífico y la trucha arcoíris (33 poblaciones/unidades) (Crozier *et al.* 2019), especies altamente migratorias (EAM) del Atlántico (58 especies/poblaciones) (Loughran *et al.* en preparación), así como especies protegidas como mamíferos marinos del Atlántico (108 especies) (Lettrich *et al.* 2023), mamíferos marinos del Pacífico (en curso) y tortugas marinas (en curso). Además de una clasificación global de vulnerabilidad para cada especie descrita anteriormente, se determinan puntuaciones cualitativas proporcionadas por el panel de expertos científicos que describen el potencial de un cambio de distribución, el efecto direccional (positivo, negativo, neutro) del cambio climático y un valor de calidad de los datos. Para cada especie se elabora un texto que describe las puntuaciones específicas y las contextualiza con el ciclo vital y el comportamiento de la especie. Estos resultados han informado documentos de la Ley de Especies Amenazadas (ESA), evaluaciones de riesgos, ejercicios de planificación de escenarios y necesidades de investigación y datos. Dado el amplio uso de este método de CVA para especies específicas, otros grupos han completado CVA similares 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 CVA se ha adaptado también para hábitats específicos. Farr *et al.* (2021) evaluaron la vulnerabilidad al cambio climático de 52 hábitats marinos, estuarinos y ribereños del noreste de Estados Unidos.

En el sureste de Australia se desarrolló un tipo diferente de CVA utilizando análisis multicriterio para cinco especies de peces pelágicos costeros. Champion *et al.* (2023) utilizaron literatura, datos disponibles y conocimientos de expertos para establecer criterios que especificaran las preferencias de las especies por determinados hábitats y condiciones ambientales y luego utilizaron esos mismos recursos para ponderar

esas condiciones ambientales en función de la importancia que tuvieran esos tipos de condiciones para una especie. De forma similar a un MDE, esta información se utilizó para calcular el cambio en la idoneidad de hábitat y, por tanto, la vulnerabilidad, y se proyectó espacialmente entre dos periodos de tiempo. Una ventaja de este método es que es espacialmente explícito y, por tanto, puede informar la ordenación de una región específica. Este método también puede utilizarse en el caso de especies sobre las que se disponga de pocos datos y cuya distribución no esté claramente definida, pero en las que los criterios de conocimiento de expertos puedan constituir la base de la distribución de la especie.

En el Mar Mediterráneo, se desarrolló una versión diferente de una CVA para varias pesquerías y se denominó evaluación de riesgo climático (CRA, por sus siglas en inglés) (Pita *et al.* 2021). Este estudio se centró en aproximadamente 100 especies que eran las más importantes para las pesquerías en el Mediterráneo y utilizó dos componentes, similares a las CVA de Estados Unidos. Se utilizaron MDE para determinar la distribución de las especies y se calculó la exposición climática con base en el cambio de las variables ambientales a lo largo de dos periodos de tiempo. También se identificaron y puntuaron las sensibilidades biológicas basadas en rasgos. Las puntuaciones de exposición y sensibilidad se combinaron para obtener la puntuación de peligro de una especie (Figura 2a). Las puntuaciones de peligro de las especies se introdujeron en pasos adicionales para determinar finalmente el riesgo para las pesquerías; el resto de los pasos se discutirán en la Sección 3.4.2 sobre CVA específicas para pesquerías y socioeconomía.

El último enfoque de CVA destacado se desarrolló inicialmente como un índice global de riesgo climático, pero fue adaptado a las pesquerías canadienses. Boyce *et al.* (2022) evaluaron casi 25,000 especies en todo el mundo utilizando MDE como distribución base para una especie y desarrollaron tres: 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 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 proporciona una categoría de riesgo climático. El análisis global se realizó en una cuadrícula global de 1° x 1°, que es bastante gruesa. Sin embargo, este enfoque se está adaptando para las aguas atlánticas de Canadá, para ~2,000 especies, y una resolución espacial de 0.25°. Al igual que Pita *et al.* (2021), el resultado de este índice de riesgo climático se introduce en los pasos posteriores para evaluar la vulnerabilidad de las pesquerías en conjunto. En las Secciones 3.4.2 y 4.3 se profundizará sobre este trabajo.

3.4.2 Pesquerías y socioeconomía

Aunque menos comunes que las CVA de especies, en varias regiones se han desarrollado CVA pesqueras y socioeconómicas. Como se mencionó anteriormente, la CRA desarrollada para los peces del Mar Mediterráneo calculó una puntuación de peligro para cada especie (Pita *et al.* 2021). Posteriormente, se calculó una puntuación de peligro pesquero para cada país con buques que pescan en el Mar Mediterráneo basada en la proporción de capturas de cada país. Después se desarrolló un indicador de exposición pesquera para cada país a partir del porcentaje de mano de obra en la pesca, el porcentaje del PIB aportado por las descargas de productos del mar y la proteína de pescado como proporción de la proteína animal (Figura 2b). También se calculó un indicador de vulnerabilidad para cada país a partir de tres factores socioeconómicos: Índice de Desarrollo Humano, subsidios de pesca como porcentaje de las descargas totales, y número de publicaciones científicas relacionadas con la ordenación pesquera en proporción al tonelaje descargado del país (Figura 2c). Las puntuaciones de peligro, exposición y vulnerabilidad pesquera se combinaron para obtener un valor de riesgo pesquero global para cada país (Figura 2d). Este ejercicio puso de manifiesto las marcadas diferencias en las evaluaciones de riesgo climático 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 el punto de vista de la pesca.

Al igual que el enfoque de CRA del Mar Mediterráneo, el enfoque de CVA de Canadá combina tres componentes importantes: el ecológico (índice de riesgo climático; mencionado anteriormente en la Sección 3.4.1), el de infraestructura y el de ordenación (Boyce *et al.* 2023). En el componente de infraestructura, la vulnerabilidad económica de las pesquerías se evalúa mediante el índice de vulnerabilidad de las infraestructuras costeras (CIVI, por sus siglas en inglés). El CIVI es una herramienta de adaptación a escala nacional del Ministerio de Pesca y Océanos de Canadá (DFO) para evaluar la vulnerabilidad de los puertos. Al igual que otros enfoques de CVA, el CIVI se divide en tres subíndices: exposición al clima (por ejemplo, cambio del nivel del mar, viento, oleaje), sensibilidad (por ejemplo, estado y protección del puerto) y adaptabilidad (por ejemplo, variabilidad del costo de los repuestos por daños). Estas tres puntuaciones se combinan para obtener la puntuación de infraestructura o socioeconómica (CIVI). Para el componente de ordenación, se está diseñando una encuesta que se enviará a los gestores pesqueros para ayudar a evaluar cómo puede tenerse en cuenta el clima en las decisiones de ordenación y determinar los obstáculos y recursos necesarios para apoyar las pesquerías resilientes al clima. Los tres componentes forman parte de un marco más amplio desarrollado por investigadores canadienses que se discutirá en la Sección 4.3.

El Fondo de Defensa del Medio Ambiente (EDF, por sus siglas en inglés) está desarrollando su propio proceso de CVA por etapas y lo está aplicando a pesquerías en las Bahamas y Belice. Al igual que en los ejemplos encionados anteriormente en la Sección 3.4.1, se desarrolló una CVA inicial para peces que reflejaba el método de CVA de la NOAA, aunque el enfoque del EDF permitía que las clasificaciones finales de vulnerabilidad cambiaran en función de las aportaciones de los pescadores locales (Carroll *et al.* 2023). Una vez generadas las clasificaciones finales de vulnerabilidad ajustadas por especie, dichas clasificaciones se insertarán como puntuación de exposición en una CVA de segundo nivel centrada en la pesquería. Se seleccionará un conjunto diferente de atributos de sensibilidad para la CVA pesquera para obtener una puntuación de sensibilidad y las puntuaciones de exposición y sensibilidad se combinarán para generar una clasificación de vulnerabilidad pesquera. Esta CVA identificará qué pesquerías pueden ser más vulnerables a la disminución de las especies objetivo en función de la estrategia de pesca, el momento y la ubicación. La clasificación final de vulnerabilidad pesquera se insertará como puntuación de exposición en una CVA de tercer nivel centrado en la comunidad pesquera. Se identificará un nuevo conjunto de atributos de sensibilidad para la CVA de la comunidad pesquera, de modo que pueda calcularse una puntuación de sensibilidad. Al igual que en los otros niveles, las puntuaciones de exposición y sensibilidad se combinarán para obtener una clasificación de vulnerabilidad de la comunidad pesquera. El último paso de la CVA identificará qué comunidades pesqueras son más vulnerables al declive de la pesca en función de su grado de dependencia de la pesca y de su capacidad de adaptación a los cambios.

3.5 Planificación de escenarios de cambio climático

La planificación de escenarios es una herramienta que ayuda a los responsables de la toma de decisiones a prepararse para futuros plausibles. Esta herramienta no predice el futuro, sino que facilita la presentación de una serie de futuros posibles para los que prepararse (Schwartz 1996, Peterson *et al.* 2003). En el contexto de pesquerías resilientes al clima, puede utilizarse para ayudar a los gestores pesqueros a prepararse para las diversas formas en que el cambio climático podría afectar a las pesquerías, tanto positivas como negativas. La planificación de escenarios utiliza un enfoque participativo que reúne a diversas partes interesadas para ayudar a dar forma a los futuros plausibles. Este proceso suele incluir los siguientes pasos: i) identificar los impulsores clave, ii) determinar las incertidumbres importantes, iii) desarrollar escenarios plausibles en el 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 diversos campos, pero a continuación se examinan algunos ejemplos en pesquerías marinas.

3.5.1 Estudio de caso en la costa este de Estados Unidos

A lo largo de la costa este de Estados Unidos, múltiples organizaciones de ordenación pesquera son responsables de la ordenación de las poblaciones de peces en sus regiones específicas. A medida que el cambio climático provoca cambios espaciales en las poblaciones de especies, surgen posibles problemas jurisdiccionales y de gobernanza. Por ejemplo, ¿cómo pueden prepararse mejor los gestores para una situación en la que una especie objetivo se desplaza a una nueva región que no cuenta con un plan de ordenación pesquera? ¿Qué ocurre con los pescadores que tienen una licencia para pescar una especie que ya no está presente en su región? El ejercicio de planificación de escenarios fue desarrollado por múltiples participantes y partes interesadas dentro de las diversas organizaciones de ordenación para ayudar a estos grupos a prepararse mejor para los impactos climáticos en los próximos 20 años (MAFMC 2023). En primer lugar, se determinaron las fuerzas que impulsan los cambios oceanográficos, biológicos, sociales y económicos y se comunicaron a las partes interesadas. Posteriormente, un grupo de 70 partes interesadas (incluyendo gestores, científicos pesqueros, pescadores, trabajadores de la industria y defensores) colaboraron en un taller para desarrollar escenarios plausibles dentro de los ejes de incertidumbre: salud de la productividad de la población, previsibilidad del cambio en las condiciones oceánicas y distribución de las especies, y adaptabilidad de la industria (ver la Figura 3). Estos escenarios se refinaron y redujeron a cuatro escenarios plausibles (MAFMC 2023). En un segundo taller, los representantes de las organizaciones participantes se reunieron con el objetivo de formular recomendaciones de gobernanza, ordenación y monitoreo para abordar los problemas comunes encontrados en todos los escenarios. Las recomendaciones se agruparon en acciones de prioridad alta, media y baja y se crearon dos grupos de liderazgo climático para evaluar y supervisar la implementación de cualquier acción.

3.5.2 Estudio de caso de una pesquería de pequeña escala en Sudáfrica

Un ejercicio similar de planificación de escenarios se desarrolló para una pesquería de pequeña escala en Sudáfrica con un mayor enfoque en la economía (Gammage y Jarre 2021). Tras identificar los impulsores del cambio (es decir, los factores de estrés) mediante métodos de estudio cualitativos y cuantitativos con los pescadores, se utilizaron herramientas estructuradas de toma de decisiones para proporcionar conocimientos adicionales sobre dichos impulsores (por ejemplo, cambios en las corrientes y en la TSM óptima). Estas herramientas consisten en mapas y redes bayesianas de creencias. En Gammage y Jarre (2021) se puede encontrar una explicación detallada de estos métodos. 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 otros dos ejes impulsores: "cambio climático" y "disponibilidad de peces". El resultado fueron cuatro escenarios plausibles (ver la Figura 6 en Gammage y Jarre 2021). Aunque se trata de un estudio de caso, este ejercicio brindó a un grupo diverso de partes interesadas la oportunidad de interactuar y visualizar cuestiones marinas desde diferentes perspectivas y escalas. También demostró que la incorporación de un enfoque "de abajo hacia arriba" en la ordenación de las pesquerías de pequeña escala con aportaciones directas de los conocimientos locales y ecológicos es importante a la hora de informar a los responsables de políticas.

3.5.3 Estudio de caso del salmón atlántico en Estados Unidos

Para mejorar la resiliencia de las poblaciones de salmón atlántico al cambio climático, la NOAA también implementó la planificación de escenarios (Borggaard *et al.* 2019). Al igual que en los otros ejemplos de planificación de escenarios, se identificaron los impulsores climáticos/físicos y no climáticos en los ambientes de agua dulce, estuarinos y oceánicos habitados por el salmón a lo largo de su vida. Estos

impulsores se describieron a los participantes en la planificación de escenarios, incluidos expertos nacionales como investigadores y gestores del salmón, científicos del clima y de cuencas hidrográficas y fisiólogos de peces. Las condiciones climáticas (cálidas/más húmedas vs. cálidas/secas) y la accesibilidad a hábitats de agua dulce se seleccionaron como los dos ejes principales de incertidumbre cruzados. Esto dio lugar a cuatro escenarios plausibles, en los que los participantes pudieron destacar las acciones de investigación y ordenación de alta prioridad necesarias para la recuperación para ayudar a mitigar los efectos de los posibles escenarios futuros.

3.6 Evaluación de estrategias de ordenación

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

La evaluación de estrategias de ordenación (EEO) consiste en utilizar simulaciones para evaluar la eficacia y robustez de procedimientos alternativos de ordenación dados un conjunto de objetivos (Punt *et al.* 2016). Las EEO pueden probar procedimientos de ordenación con diferentes tipos de datos, múltiples enfoques analíticos y diversos procesos específicos que conducen a una acción de ordenación. Se han desarrollado dos enfoques principales para incorporar el cambio climático y los impactos ambientales en las EEO: mecanicista y empírico (Punt *et al.* 2014). El enfoque mecanicista utiliza los resultados de modelos climáticos globales para estimar la relación entre el medio ambiente y procesos específicos de dinámica de poblaciones para, en última instancia, predecir tendencias poblacionales. Esto implica identificar los mecanismos subyacentes a los impactos climáticos en los procesos de las poblaciones (crecimiento, reclutamiento, etc.), evaluar el modelo y el escenario climático adecuados para la región de interés, reducir con precisión la escala del modelo climático a la región de interés, incorporar las variables ambientales extraídas en modelos de proyección y crear proyecciones de las que puedan extraerse acciones de ordenación. La representación de la incertidumbre es un aspecto crítico de este proceso, sobre todo debido a la incertidumbre sobre lo bien que las variables ambientales pueden predecir los parámetros en la dinámica de las poblaciones y lo preciso que puede ser el modelo de previsión de clima en el futuro. El enfoque empírico utiliza tendencias al aplicar la relación entre el clima y diversos parámetros en el modelo operativo, lo que da lugar a tendencias plausibles en lugar de proyecciones. El enfoque empírico se utiliza cuando los impactos climático o ambientales se basan en hipótesis y no en datos, y puede aplicarse para comprobar qué estrategias genéricas de ordenación son robustas ante los cambios de los parámetros biológicos.

Punt *et al.* (2014) describieron algunas formas habituales de incorporar el cambio climático a las EEO. Entre ellas se incluyen el enfoque de B_0 (biomasa en ausencia de pesca) dinámica, el enfoque de ventana móvil y el enfoque STARS. El enfoque de B_0 dinámica permite que la biomasa en ausencia de pesca estimada varíe con el tiempo para reflejar los cambios a lo largo del tiempo 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 de reclutamiento a lo largo de un número específico de años (por ejemplo, 25 años). Este enfoque da lugar a una serie de puntos de referencia de biomasa que reflejan idealmente la variedad de condiciones ambientales experimentadas a lo largo del tiempo. El enfoque de análisis de prueba t secuencial de cambios de régimen (STARS) (Punt *et al.* 2014) utiliza un algoritmo para delinear los regímenes en función de la diferencia entre los años posteriores y el régimen actual. Si un número suficiente de 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 extracción se basarían en el conjunto de años del régimen más reciente.

3.6.2 Estudios de caso

La incorporación de los impactos climáticos a las EEO ha dado resultados dispares. Punt *et al.* (2013) utilizaron un enfoque empírico para evaluar el desempeño de una estrategia de ordenación de la langosta

en Australia que probaba los cambios de la mortalidad natural y el crecimiento a lo largo del tiempo y no encontraron cambios en el desempeño. Un estudio mecanicista comparó dos estrategias de ordenación para el colín del Golfo de Alaska en el que una estrategia reflejaba la incertidumbre relacionada con la vinculación de la TSM y la precipitación con el reclutamiento, los valores de los parámetros de esas relaciones y las predicciones de las variables a partir de múltiples modelos climáticos (A'mar *et al.* 2009). Descubrieron que los resultados dependían en gran medida del modelo climático, y que la estrategia de B_0 dinámica no era sustancialmente mejor que la estrategia que no incorporaba los efectos del clima en el reclutamiento. Tommasi *et al.* (2017) utilizaron anomalías de la TSM pronosticadas estacionalmente para comparar la biomasa relativa de poblaciones de sardinas del Pacífico. Las directrices de extracción en las que las predicciones de anomalías de la TSM informaron las predicciones de biomasa de las poblaciones condujeron a mejoras en la biomasa y el rendimiento y disminuyeron la probabilidad de que la biomasa y el rendimiento cayeran por debajo de los niveles socioeconómicos y ecológicos permitidos. Otro estudio utilizó EEO para ayudar a informar la ordenación espacial para la mitigación de la captura incidental en la pesquería de pez espada con redes agalleras de deriva a lo largo de California (Kaplan *et al.* 2021, Smith *et al.* 2021). Se simuló las capturas de pez espada y las capturas incidentales de tortuga laúd y tiburón azul en respuesta a áreas de veda estáticas y dinámicas y se generaron 10 métricas de desempeño, como la captura total de pez espada por temporada de pesca y el número de tortugas capturadas por pez espada capturado. Los autores descubrieron que el área de veda altamente dinámica tenía un mejor desempeño bajo el supuesto de una gran disponibilidad de datos y un hábitat de especies dinámico. También a lo largo de la costa oeste de Estados Unidos, se sabe que el reclutamiento de bacalao negro está relacionado con el forzamiento climático a gran escala a través del nivel del mar y comunidades de zooplancton. Haltuch *et al.* (2019) determinaron a través de EEO que, a pesar de las pequeñas fluctuaciones en el reclutamiento debido a los niveles futuros del mar, la población de bacalao negro no cae por debajo del tamaño de la población que iniciaría una veda de la pesquería. Un último ejemplo utilizó EEO para informar la ordenación bilateral de la pesquería de merluza entre Estados Unidos y Canadá (Kaplan *et al.* 2021). Se determinó la sensibilidad del desempeño de la regla de control de extracción bajo desplazamientos variables impulsados por el clima y cambios en la selectividad dependiente de la edad de las pesquerías de los dos países. Las pruebas de simulación mostraron que la actual regla de control de extracción era suficientemente robusta ante los escenarios climáticos.

3.7 Evaluaciones de poblaciones informadas por el clima

Las evaluaciones de poblaciones utilizan información demográfica y pesquera de las especies para evaluar los efectos de la pesca en las poblaciones de peces, teniendo en cuenta la incertidumbre. El resultado de este proceso puede ser la determinación de la condición de la población, la proyección de los niveles futuros de captura y la recomendación de rendimientos o intensidades de pesca. Los científicos formulan recomendaciones sobre niveles sostenibles de extracción o mortalidad por pesca con base en los resultados de las evaluaciones de poblaciones, para que los gestores pesqueros puedan tomar decisiones informadas sobre las medidas de ordenación. Aunque las evaluaciones de poblaciones previas de la CIAT proporcionaban proyecciones, las actuales no proporcionan proyecciones futuras.

3.7.1 Integración de las evaluaciones de poblaciones y el medio ambiente

En los últimos años se han desarrollado múltiples enfoques que tratan de incorporar el medio ambiente y el ecosistema al proceso de evaluación de poblaciones. Las herramientas climáticas, como las CVA y los indicadores, pueden ayudar a priorizar las especies para las cuales realizar evaluaciones de poblaciones. Las variables ambientales se han utilizado para informar las tendencias históricas en procesos biológicos como el reclutamiento, el crecimiento, la abundancia y la distribución, así como sobre 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 común en comparación con la incorporación

de variables de forzamiento climático. En 2011, la CIAT celebró un taller sobre el uso de la oceanografía para la evaluación y ordenación de poblaciones de peces y elaboró un proyecto 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 poblaciones de peces y análisis relacionados. Por ejemplo, Maunder y Watters (2003) desarrollaron un enfoque estadísticamente riguroso para incluir datos ambientales en modelos de evaluación de poblaciones y realizar pruebas de hipótesis, particularmente cuando se combinan con el enfoque de efectos aleatorios/estado-espacio propuesto por Maunder y Deriso (2003). Hinton (1996) desarrolló un enfoque mecanicista para tener en cuenta factores ambientales, de comportamiento y fisiológicos al estandarizar los datos de CPUE teniendo en cuenta la profundidad del arte de palangre y la preferencia de hábitat de la especie, y se aplicó el enfoque a la aguja azul. Maunder *et al.* (2006) pusieron el enfoque en un marco estadístico y Maunder y Hinton (2006) implementaron el enfoque utilizando una red neuronal. El programa de evaluación de poblaciones, Stock Synthesis (Methot Jr y Wetzel 2013), permite incluir variables ambientales para los procesos biológicos (por ejemplo, reclutamiento, crecimiento, mortalidad natural) y pesqueros (selectividad y capturabilidad).

El Modelo Espacial de Dinámica de Poblaciones y Ecosistema (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 ordenación de poblaciones de atunes en relación con la variabilidad del clima y el ecosistema. Se ha aplicado en el OPOC.

Los enfoques cuantitativos más complejos, que requieren más datos y recursos, intentan vincular directamente el medio ambiente o el ecosistema con un parámetro o índices de una población. Si la relación entre el medio ambiente y la dinámica de una población está estrechamente vinculada, si se dispone de datos, si hay una manera de incorporar esa relación en el proceso de evaluación de la población, y si la relación se puede predecir con relativamente poca incertidumbre, entonces puede ser apropiado ampliar la evaluación de la población para incluir una variable ambiental o ecosistémica (Lynch *et al.* 2018).

Las evaluaciones de poblaciones suelen ser 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). Sobre todo, si se combinan con una ordenación dinámica (por ejemplo, puntos de referencia dinámicos). Por lo tanto, es poco probable que los impactos del cambio climático sobre el reclutamiento sesguen las evaluaciones de poblaciones. Sin embargo, pocas evaluaciones de poblaciones, especialmente las de atunes tropicales, disponen de estimaciones fiables variables con el tiempo del crecimiento, la mortalidad natural o la relación talla-peso. Por lo tanto, es posible que las evaluaciones de poblaciones no sean robustas ante los cambios en estos procesos provocados por el clima. Las evaluaciones de poblaciones pueden ser robustas ante los cambios en la disponibilidad, capturabilidad y/o selectividad, pero es probable que sean específicas de cada aplicación. Además, es posible que los cambios en la relación población-reclutamiento impulsados por el clima no sean detectables y que la ordenación no sea robusta ante estos cambios.

Los métodos actuales de elaboración de índices de abundancia y datos de composición asociados que se utilizan en las evaluaciones de poblaciones podrían ser robustos ante el cambio climático porque se basan en modelos espaciotemporales. Sin embargo, como la distribución espacial de la población cambia, los datos deben cubrir toda la distribución de la población (por ejemplo, el área de estudio debe cambiar). En el caso de los índices basados en datos de CPUE, esto significa que la pesquería debe desplazarse hasta donde se encuentran los peces. Esto pone de relieve la necesidad de programas de monitoreo que sean robustos ante el cambio climático.

Hay que 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 completamente con la abundancia de la población. Por lo tanto, es más robusto utilizar covariables estratificadas espaciotemporalmente en la estandarización de la CPUE. Sin embargo, es importante especificar correctamente si la covariable ambiental está relacionada con la abundancia o con la capturabilidad.

Dado que es muy probable que el cambio climático influya en la distribución espacial de especies reproductoras pelágicas de gran movilidad y fecundidad como los atunes, cualquier método de monitoreo y evaluación debe tener en cuenta los posibles cambios espaciales en la distribución de las poblaciones. Dado que el área de distribución de los atunes hace que los estudios sean poco prácticos, y que la pesquería, que puede utilizarse para generar índices de abundancia relativa basados en la CPUE, no necesariamente sigue los cambios espaciales, es necesario considerar enfoques alternativos para monitorear y evaluar las poblaciones de atunes en vista del cambio climático. Esto es especialmente relevante ya que las pesquerías de palangre, que se han utilizado tradicionalmente para crear índices de abundancia, han ido reduciendo su área de distribución espacial.

El marcado se ha promovido e implementado como un enfoque candidato para obtener información sobre la abundancia de los atunes, pero ha sido relativamente infructuoso, especialmente en el caso de los atunes tropicales, debido a varios factores, incluyendo las limitadas oportunidades de marcar peces y la no mezcla de marcas con toda la población. El marcado y recaptura por parientes cercanos puede superar muchos de los problemas del marcado tradicional, pero ha tenido una aplicación limitada y se limita a estimar la abundancia de la población adulta, mientras que muchas pesquerías atuneras (por ejemplo, la de cerco) capturan juveniles. Por lo tanto, la información sobre la abundancia de juveniles puede ser esencial para el monitoreo y la evaluación de las poblaciones de atunes.

Un enfoque reciente que utiliza métodos de modelado espaciotemporal para tener en cuenta la no mezcla de marcas ha demostrado ser prometedor para estimar la abundancia absoluta de las poblaciones de atunes. La estimación de la abundancia absoluta es más informativa que los enfoques basados en índices de abundancia relativa que requieren la influencia de la captura en el índice para escalar la abundancia absoluta o varios supuestos para derivar la abundancia absoluta de los datos de composición. El modelo espaciotemporal de marcado modela explícitamente el desplazamiento de las marcas con base en datos ambientales. Por lo tanto, también tiene el potencial de hacer frente a los cambios en la distribución espacial del ambiente, y en consecuencia de la población, causados por el cambio climático. Además, como también utiliza información de marcas archivadoras para informar el desplazamiento, puede dar cuenta de los desplazamientos de los peces fuera del área de distribución de la pesquería cuando las marcas convencionales no se recapturan. Por lo tanto, tiene el potencial de proporcionar un enfoque de monitoreo y evaluación robusto ante el cambio climático.

Este método se ha utilizado para estimar la abundancia absoluta del atún barrilete en el OPO (SAC-15 INF-G). Estas estimaciones se basan en datos de marcado limitados, pero ya se ha producido una estimación con un CV de 30%, lo cual es revolucionario dado que es una estimación de la abundancia absoluta. Este método podría utilizarse con los datos actuales para producir también estimaciones de las poblaciones de patudo y aleta amarilla en el OPO. La mejora de los datos de marcado a través de futuros cruceros de marcado produciría estimaciones aún más fiables y proporcionaría un monitoreo y evaluación robustos ante el cambio climático.

3.7.2 Estudios de caso

En algunos casos se han incluido forzamientos ambientales en los procesos de evaluación de poblaciones. Frente a la costa este de Estados Unidos, la temperatura del fondo se incorporó en la evaluación de las poblaciones de palometa y sargo (NEFSC 2015, Adams 2018). Específicamente, la temperatura del fondo

se utilizó para desarrollar un índice de idoneidad de hábitat o un modelo de hábitat térmico. Luego se calculó la proporción de hábitats idóneos disponibles muestreados por el estudio científico, que informó el parámetro de capturabilidad del estudio. Se desarrolló un modelo similar de idoneidad de hábitat para múltiples etapas de vida de especies de meros en el Golfo de México que coincidían con episodios de marea roja. Posteriormente, se incorporó un índice de gravedad de la marea roja como variable que influye en la mortalidad natural (SEDAR 2019). Debido a su corta vida, la pota saltadora está fuertemente influenciada por el medio ambiente, por lo que se desarrolló un modelo de producción excesiva dependiente del medio ambiente para la evaluación de su población. Específicamente, la capacidad de carga se vio influenciada por la variabilidad en el hábitat favorable para el desove impulsado por la temperatura, y la tasa de crecimiento intrínseca se vio afectada por la variabilidad en el hábitat de alimentación atribuido a diferentes rangos de temperatura. La inclusión de la temperatura mejoró el ajuste del modelo y condujo a puntos de referencia más conservadores en comparación con el modelo convencional (Wang *et al.* 2016). En las evaluaciones de poblaciones de Canadá, el 21% (38/178) incorporó variables ambientales (Pepin *et al.* 2022). En los modelos de poblaciones, se estimaron parámetros variables con el tiempo como la mortalidad natural para tener en cuenta la depredación, o el crecimiento y la capturabilidad para tener en cuenta las condiciones cambiantes del océano. 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 de la población reproductora 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 variara con el tiempo. También se consideraron los efectos de las variables ambientales en la variación de las migraciones o la disponibilidad de hábitats de desove. Lee *et al.* (2017) utilizaron análisis de simulación para investigar la variación temporal impulsada por el clima en los desplazamientos del atún aleta azul. De las variables ambientales, las oceanográficas y ecológicas fueron las que se aplicaron con más frecuencia en comparación con las variables de forzamiento climático. Por ejemplo, se aplicaron variables de forzamiento climático a largo y corto plazo, como el Índice Decadal del Pacífico, a las especies anádromas (Pepin *et al.* 2022).

3.8 Sistemas de ordenación flexibles

La ordenación pesquera busca mantener la sostenibilidad, lo que a menudo hace difícil que los gestores se adapten a las condiciones cambiantes. Hay varias formas de aumentar la flexibilidad de la ordenación en el futuro en respuesta a cambios en las especies, el comportamiento de los pescadores o los mercados. Una de las herramientas que utilizan los gestores para alcanzar los objetivos de conservación es la creación de áreas de veda estáticas y áreas marinas protegidas. Aunque las áreas de veda pueden ser eficaces, son una herramienta que no responde a los cambios en las condiciones oceánicas, la distribución de las especies, las prácticas pesqueras y los reglamentos de ordenación. En cambio, la ordenación dinámica de los océanos es una herramienta de ordenación espacial en la que las áreas de veda son dinámicas y adaptables en el espacio y el tiempo. Suelen basarse en los MDE y en las condiciones ambientales recientes, históricas o futuras. Algunas herramientas voluntarias de ordenación espacial, como EcoCast (Hazen *et al.* 2018) y TurtleWatch (Howell *et al.* 2015), se han creado, en su mayoría destinadas a proteger determinadas especies vulnerables. A partir de estas herramientas se elaboran mapas diarios que se facilitan a los pescadores a través de diferentes plataformas digitales. Estos mapas muestran las áreas que se prevé que sean mejores (es decir, las especies objetivo se encuentran junto a muy pocas o ninguna especie de captura incidental) o peores (es decir, las especies de captura incidental pueden ser abundantes en estas áreas) para la pesca, con base en la razón de captura incidental a captura objetivo. Aunque estas herramientas no requieren que los pescadores sigan las áreas recomendadas, los estudios han demostrado que si se siguen, las áreas de veda dinámicas prohibirían la pesca en una fracción del área, mientras que tienen el potencial de proteger más especies de captura incidental, manteniendo la

captura objetivo en comparación con un área de veda estática, incluida la pesquería atunera de cerco en el OPO (Hazen *et al.* 2018, Pons *et al.* 2022). En Australia, se utilizó la ordenación dinámica de los océanos para generar diferentes zonas de pesca cada dos semanas en función de un MDE del atún aleta azul y TSM proyectada (Hobday y Hartmann 2006). Se exigió a los pescadores que siguieran estas zonas en función del nivel de cobertura por observadores y de la cuota de atún que tuvieran asignada. También se produjeron pronósticos estacionales (con 3-4 meses de antelación) que se compartieron con los pescadores para que la industria pudiera prepararse para los distintos cambios ambientales (Hobday *et al.* 2011). La escala temporal de este tipo de herramientas, ya sea diaria, semanal, mensual o anual, depende del objetivo de ordenación y de si se prefieren áreas de veda dinámicas voluntarias u obligatorias.

Otros aspectos de la ordenación también se beneficiarían de una mayor flexibilidad y capacidad de adaptación. Por ejemplo, puede ser necesario que las cuotas fluctúen más a menudo dentro de una región de ordenación específica o entre regiones de ordenación o temporadas. Muchos pescadores están atados a un tipo de arte específico en función de su estrategia de pesca y sus licencias. Crear una forma de hacer que las licencias sean transferibles o más accesibles a medida que cambian los recursos permitirá a los pescadores adaptarse más fácilmente. La asignación de cuotas entre fronteras jurisdiccionales, ya sean internas o internacionales, deberá ser adaptable para reflejar los cambios en la distribución de las especies, lo que se espera que conduzca a un aumento de los acuerdos de ordenación transfronterizos. Un estudio reciente examinó ocho acuerdos pesqueros transfronterizos y descubrió que ninguno mencionaba el cambio climático en el acuerdo original y solo tres asignaban recursos significativos a la ordenación pesquera ecosistémica y a la ciencia del clima (Koubrak y VanderZwaag 2020). Estados Unidos y Canadá tienen actualmente un acuerdo de ordenación conjunta para el bacalao del Atlántico y la limanda, y se ha descubierto que a medida que se intensifique el cambio climático los regímenes de ordenación serán menos estables (Sumaila *et al.* 2020). Pinsky *et al.* (2018) sugieren que los organismos de ordenación deberían planificar con antelación y elaborar proyecciones fiables de especies que puedan compartirse. Además, se prevé que las distribuciones de los atunes a nivel mundial cambien debido al calentamiento a largo plazo (Erauskin-Extramiana *et al.* 2019). Los organismos de ordenación se beneficiarían de la actualización rutinaria y objetiva de las asignaciones de captura y esfuerzo para reflejar los cambios en la distribución, al tiempo que consideran el acceso a la pesca que podría ocurrir entre fronteras políticas. Se espera que estos temas aumenten y muchas de las herramientas mencionadas anteriormente pueden utilizarse para ayudar a desarrollar acuerdos. Estos temas serán fundamentales a medida que avancen las discusiones sobre las áreas marinas fuera de la jurisdicción nacional (ABNJ), especialmente en el contexto del cambio climático. Es probable que las OROP, como los principales organismos regionales de pesca, participen en la coordinación entre los países que están llevando a cabo esfuerzos en materia de cambio climático.

A la hora de aplicar sistemas de ordenación flexibles, es importante tener en cuenta el periodo de interés. ¿Los gestores quieren prepararse para los efectos multidecadales previstos del cambio climático? ¿Les preocupa si su estructura de ordenación es lo bastante robusta para hacer frente a la variabilidad climática a lo largo de una década? ¿O prefieren ser flexibles en relación con los ciclos plurianuales (ENOS) o los patrones estacionales? Este tipo de decisiones se toman en el marco de un plan de trabajo sobre el clima que se describe detalladamente en la Sección 5.

4. MARCOS PESQUEROS RESILIENTES AL CLIMA

Las herramientas descritas anteriormente esbozan enfoques para evaluar y mitigar mejor los efectos del cambio climático sobre las especies, los ecosistemas y las pesquerías. Para garantizar que estas herramientas se apliquen en un contexto de ordenación pesquera, es fundamental disponer de un marco que las incorpore al proceso de ordenación. A menudo, las herramientas se desarrollan y no se enmarcan

adecuadamente para responder a las cuestiones de ordenación, no se comunican adecuadamente a los gestores pesqueros, o no está claro para los gestores cómo pueden aplicarse estas herramientas directamente en la ordenación. Para evitar estos posibles resultados no deseados, es necesario desarrollar un marco de trabajo —idealmente antes de desarrollar las herramientas— para que éstas puedan incorporarse adecuadamente a la ordenación. Un marco proporciona un flujo de trabajo organizado que consiste en pasos operativos que suelen ser iterativos para lograr un conjunto de objetivos. Por ello, algunas organizaciones y países han empezado a desarrollar marcos pesqueros resilientes al clima para promover las pesquerías resilientes al clima. A continuación se describen cinco ejemplos.

4.1 Ciclo de conservación climáticamente inteligente

La conservación climáticamente inteligente se diseñó como guía para la ordenación de los recursos ante el cambio climático (Stein *et al.* 2014). Fue desarrollada por múltiples organizaciones federales, estatales y no gubernamentales de Estados Unidos y puede organizarse en un ciclo que consta de siete pasos (Figura 4). Cada paso del ciclo alimenta el siguiente, al tiempo que crea oportunidades para volver atrás y realizar mejoras. El proceso está pensado para que sea iterativo y adaptable, a la vez que permite la ordenación en función de los cambios, en lugar de suponer el *statu quo*. El proceso está diseñado para reconocer la variabilidad del sistema, al tiempo que se evalúan de forma intencional y transparente las vulnerabilidades climáticas, se identifican los planes de adaptación y se implementan los planes que reducen dichas vulnerabilidades. Al mismo tiempo, pretende alcanzar objetivos proactivos de conservación y ordenación. Actualmente, la NOAA está trabajando para integrar las herramientas que ha desarrollado en este marco. Por ejemplo, la planificación de escenarios, las CVA, los MDE, los indicadores y los datos oceánicos pueden utilizarse para evaluar los impactos climáticos y las vulnerabilidades (paso 2), mientras que la planificación de escenarios y los MDE pueden utilizarse para revisar las metas y objetivos de conservación (paso 3), identificar las posibles opciones de adaptación (paso 4) y evaluar y seleccionar las acciones de adaptación (paso 5). Para la implementación de los planes prioritarios de adaptación (paso 6), pueden aplicarse herramientas de ordenación espacial, reglas de control de extracción y otros sistemas de ordenación flexibles a la ordenación transfronteriza de poblaciones. Herramientas como los indicadores y los MDE pueden dar seguimiento a la eficacia de las medidas y a la respuesta ecológica (paso 7). Para más información, consulte el documento publicado en Stein *et al.* (2014) y la Figura 4.

4.2 Marco para la evaluación integral de poblaciones y hábitats (FISHE)

FISHE (<https://fishe.edf.org/>) es un marco por pasos desarrollado por EDF para ayudar a los gestores a evaluar y desarrollar pesquerías sostenibles ante el cambio climático y está especialmente diseñado para pesquerías con datos limitados. FISHE consta de 11 pasos (Figura 5), muchos de los cuales requieren la participación de las partes interesadas. El resultado final de FISHE es un plan de ordenación pesquera adaptativo. A lo largo de cada paso, el marco incluye herramientas y un manual completo con hojas de trabajo rellenables para ayudar al usuario a completar el paso. Por ejemplo, el primer paso se centra en la proyección de las condiciones futuras de la pesquería, ya que estas condiciones informarán los pasos siguientes, y así sucesivamente. EDF ha desarrollado múltiples herramientas para proyectar las condiciones futuras, como las CVA y los modelos de evaluación de riesgos ecosistémicos. Para el segundo paso, "Establecimiento de metas", se proporcionan metas y objetivos comunes y se dividen en "Metas de sostenibilidad de la pesca" y "Metas de resiliencia climática". A lo largo de los siguientes pasos, se han desarrollado una serie de herramientas para evaluar cualitativamente el riesgo ecológico actual (paso 3), evaluar la vulnerabilidad de las poblaciones (paso 4), calcular métricas de evaluación de las pesquerías (por ejemplo, estimaciones de mortalidad por pesca; paso 5), priorizar especies (paso 6) y desarrollar indicadores de desempeño y puntos de referencia para determinar cuándo es necesaria una acción de ordenación (paso 7). Se crean reglas de control de extracción para futuros plausibles, que eventualmente se activarían por puntos de referencia específicos (paso 8). Esto puede conducir o no a una evaluación

más detallada de la pesquería en función de la disponibilidad de datos (paso 9). Los resultados de la evaluación de la pesquería se interpretan (paso 10) y las medidas de control de extracción basadas en las reglas de control de extracción se implementan y, en su caso, se adaptan a los cambios durante un periodo específico (por ejemplo, anual; paso 11). A medida que se recolectan más datos en los años siguientes, es importante reevaluar cada paso del ciclo. El proceso completo se ha aplicado a un estudio de caso hipotético sobre una pesquería de arrecife tropical multiespecífica cercana a la costa (<https://fishe.edf.org/case-study/fishe-tool-action>).

4.3 Marco de adaptación al cambio climático para pesquerías (CAFF)

CAFF es un marco diseñado para apoyar la resiliencia climática en las pesquerías marinas canadienses (Boyce *et al.* 2023). En concreto, el CAFF evalúa las vulnerabilidades climáticas de varios componentes de las pesquerías, como las especies capturadas, las infraestructuras de la industria pesquera, y la ordenación pesquera (Figura 6). La descripción de cada componente se encuentra en la Sección 3.4. El CAFF consta de 20 índices/fuentes de datos que se ajustan a los tres componentes mencionados. Se evalúan las vulnerabilidades climáticas, se identifican los obstáculos a la adaptación y se determinan formas de superarlos en los tres componentes. Los resultados del CAFF pueden ayudar a los científicos y gestores pesqueros a priorizar la investigación, a los planificadores municipales y a las comunidades costeras a identificar los puertos más amenazados por el cambio climático, y a los responsables de la toma de decisiones a desarrollar estrategias viables de adaptación al cambio climático. Además, los resultados pueden utilizarse en otras herramientas, como la planificación de escenarios o las evaluaciones de poblaciones informadas por el clima. El DFO tiene previsto desarrollar un portal en línea en el que los usuarios puedan acceder a los resultados de vulnerabilidad climática de los tres componentes, ya sea a un nivel superior de las pesquerías canadienses o a un nivel más detallado de información sobre cada componente. El CAFF está diseñado para ser rápido, reproducible y flexible para una gama amplia de pesquerías.

4.4 Manual de adaptación al cambio climático

El manual de adaptación al cambio climático fue elaborado por investigadores, gestores y la industria pesquera de Australia para comprender la sensibilidad de los pescadores a los cambios físicos y ecológicos, la facilidad con que la pesquería puede adaptarse al cambio y si es necesario un proceso más elaborado de modificación de los planes y métodos de ordenación para adaptarse al cambio (Fulton *et al.* 2020). El manual describe una evaluación previa a la evaluación de riesgos, una evaluación de riesgos en tres pasos y una evaluación posterior a la evaluación de riesgos (Figura 7). En la evaluación previa a la evaluación de riesgos se determina el alcance de la evaluación, incluidos los objetivos, las especies de interés, las partes interesadas y la escala, así como el nivel de la evaluación de riesgos, que depende de los datos disponibles, los costos, etc.

El primer paso de la evaluación de riesgos en tres pasos se centra en los impulsores físicos y sus efectos sobre las especies y los ecosistemas. Pueden aplicarse diversas herramientas, como las CVA, los MDE y la investigación científica, para comprender hasta qué punto la abundancia, distribución, fenología y fisiología de una especie son sensibles al cambio climático. A partir de esta información se determina una puntuación de riesgo ecológico mediante puntuaciones cualitativas (bajo, medio, alto) y una tabla rellenable. El segundo paso de la evaluación de riesgos en tres pasos se centra en el riesgo pesquero mediante la elaboración de tres encuestas diseñadas para recabar el asesoramiento de las partes interesadas sobre la adaptación autónoma (medidas que los pescadores pueden adoptar dentro de la estructura de ordenación actual). El asesoramiento incluiría las posibles respuestas de adaptación, la probabilidad de implementación de esas respuestas y sus posibles repercusiones económicas y sociales. De forma similar al riesgo ecológico, para determinar la puntuación del riesgo pesquero se utilizan criterios de puntuación cualitativos y una tabla rellenable. El tercer paso determina el riesgo de

ordenación. El manual explica cinco funciones de ordenación para cumplir los objetivos de la legislación pesquera, que pueden afectar el impacto del cambio climático en la abundancia, distribución, fenología y fisiología de las especies mediante la ordenación de la captura, el esfuerzo, las artes de pesca y las restricciones espaciales o temporales. Algunos ejemplos podrían ser el ajuste del límite de captura total permisible o el fomento de la entrada de nuevos participantes en la pesquería y el cambio del área de pesca. El número de herramientas de ordenación, los costos, el tiempo de implementación y el nivel de responsabilidad se utilizan para determinar el riesgo de ordenación utilizando el mismo formato anterior.

En la evaluación posterior a la evaluación de riesgos se utilizan las puntuaciones finales de riesgo para formular recomendaciones, ponerlas en práctica y promover la ordenación adaptativa. A partir de la evaluación de riesgos detallada, se deberían conocer la sensibilidad de la pesquería a los cambios físicos y ecológicos, identificar la capacidad de adaptación de la industria a los cambios y determinar si es necesario modificar los planes y políticas de ordenación y de qué manera. Esta información también puede servir de base para otras herramientas, como las EEO y las evaluaciones de poblaciones. Este proceso puede repetirse con la adición de nuevos datos, o si hay cambios en la productividad, si se alcanza el umbral de un indicador o si se producen cambios en la disponibilidad de peces. En el manual se incluyen tablas rellenas y un ejemplo hipotético exhaustivo.

4.5 Marco de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)

La FAO ha elaborado múltiples documentos que proporcionan información sobre cómo deberían adaptarse las pesquerías al cambio climático (Barange *et al.* 2018, Bahri *et al.* 2021). A través de una revisión de estudios de caso, identificaron una lista de herramientas de adaptación que se dividen en tres categorías principales: institucionales y de ordenación, medios de subsistencia, y reducción de riesgos y ordenación para la resiliencia (Figura 8). En la categoría de herramientas institucionales y de ordenación, la FAO afirma que, con algunas modificaciones, muchas de las herramientas de las que disponen los gestores pesqueros —como la recopilación de información (por ejemplo, las evaluaciones de poblaciones), los controles de insumos (por ejemplo, las restricciones de artes de pesca) y los controles de productos (por ejemplo, los programas de reparto de capturas)— pueden utilizarse para mantener una ordenación pesquera sostenible, a pesar de tener que hacer frente al cambio climático. Algunas de esas modificaciones incluyen ser más participativos, adaptables y flexibles. Con los cambios en la ordenación, es probable que sea necesario que se produzcan cambios en las políticas públicas y los marcos jurídicos existentes mediante la mejora de los conocimientos, la transparencia, los incentivos y la adaptación. En cuanto a la adaptación de los medios de subsistencia, una estrategia común es la diversificación de los medios de subsistencia dentro de un sector, de modo que los pescadores puedan cambiar de especie objetivo debido a cambios en la distribución o a las necesidades del mercado. La FAO destaca la necesidad de centrar las nuevas estrategias de adaptación en los pescadores de pequeña escala que carecen de capacidad de adaptación. Las herramientas que pueden utilizarse para la reducción de riesgos y la ordenación para la resiliencia son el desarrollo y el uso de sistemas de alerta temprana e información para detectar anomalías de temperatura o cambios en el mercado. También se recomienda mejorar las respuestas a los impactos del cambio climático mediante compensaciones económicas y el desarrollo de estrategias de respuesta ante desastres naturales.

En Bahri *et al.* (2021), la FAO desarrolló criterios para las buenas prácticas en las medidas de adaptación al cambio climático, que incluyen: 1) abordar explícitamente los riesgos relacionados con el clima, 2) proporcionar pruebas suficientes para inferir/evaluar la eficacia o robustez, 3) ser una opción en la que todos ganan o en la que unos ganan y otros pierden, 4) ser flexible o receptiva, y 5) ser socialmente aceptable. De la revisión de estudios de caso, Bahri *et al.* (2021) también ofrecen una revisión de buenas prácticas de medidas de adaptación (Figura 9). Algunas de estas medidas de adaptación son: el ajuste de la escala espacial del monitoreo para reflejar los cambios en las poblaciones, la aplicación de temporadas

de pesca flexibles, la aplicación de derechos/asignaciones de pesca intercambiables para permitir la flexibilidad entre varios países y la aplicación de sistemas de ordenación durante la temporada para responder a los cambios provocados por el clima.

5. PROPUESTA DE PLAN DE TRABAJO SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO DE LA CIAT

Con base en la revisión llevada a cabo en este documento de las herramientas y marcos pertinentes, el personal de la CIAT desarrolló una propuesta de plan de trabajo para consideración de la Comisión. Este plan de trabajo comprende una serie de fases y componentes y su objetivo es garantizar que las pesquerías amparadas por la Convención de Antigua estén preparadas para el cambio climático y sean resilientes al cambio climático en un futuro próximo. Se espera que este plan de trabajo sea examinado y revisado por el GTECI, el CCA y la propia Comisión. Su implementación requerirá, entre otras cosas, la coordinación dentro de la Comisión, entre la Comisión y su personal, y dentro de la Secretaría, entre múltiples programas, incluyendo el Programa de Ecosistema y Captura Incidental, el Programa de Evaluación de Poblaciones, y la División de Política y Cumplimiento.

Antes de describir el plan de trabajo propuesto, que también es complementario del plan de trabajo sobre el desarrollo de una *EcoCard* para el OPO ([EB-02-02](#)), se definen a continuación los términos clave:

1. **Plan de trabajo:** la estructura jerárquica de fases, componentes y actividades asociadas para alcanzar el objetivo principal.
2. **Fase:** un periodo de tiempo en que se realizan acciones específicas.
3. **Componente:** un requisito muy importante para alcanzar el objetivo principal.
4. **Marco:** una serie de pasos operativos, a menudo iterativos, que orientan y apoyan las decisiones y las acciones.
5. **Actividad:** las acciones necesarias para alcanzar los objetivos de un componente determinado.
6. **Herramienta:** un instrumento estratégico o táctico utilizado para apoyar las decisiones y acciones de ordenación.
7. **Herramienta estratégica:** instrumentos científicos utilizados para apoyar la ordenación y abordar las *acciones* que emprenderán los científicos para evaluar, monitorear y realizar el seguimiento del desempeño y/o estado de un aspecto determinado (por ejemplo, CVA, MDE, modelos y proyecciones climáticas, indicadores ecológicos, modelos ecosistémicos, evaluaciones de riesgos ecológicos).
8. **Herramienta táctica:** instrumentos operativos utilizados para apoyar la ordenación y abordar la *manera* en que los gestores de recursos implementarán acciones de ordenación para atender un aspecto determinado (por ejemplo, implementación de reglas de control de extracción, ordenación espacial, límites de captura, vedas pesqueras, requisitos de artes de pesca, técnicas de mitigación de captura incidental, priorización de la investigación para subsanar las deficiencias de datos).

El personal dividió la propuesta de plan de trabajo de la CIAT en cinco fases y tres componentes principales. La Figura 10 y la Tabla 1 desglosan las partes del plan de trabajo (es decir, las cinco fases y los componentes principales) durante los próximos 4+ años.

Las cinco fases son: i) planificación, ii) decisión sobre el alcance y los objetivos, iii) desarrollo de un marco, iv) creación de herramientas, y v) aplicación de las herramientas y/o implementación de la ordenación.

Los tres componentes incluyen i) el marco, ii) las herramientas, iii) y las consideraciones de ordenación (cuadros azules de la Figura 10), todos ellos requisitos iterativos para alcanzar la meta de pesquerías resilientes al clima (cuadro gris de la Figura 10). La finalidad de los componentes también se incluye y describe en los cuadros amarillos de la Figura 10. Será necesario completar varias actividades para lograr estos componentes, ya sea a través de reuniones, talleres o por el personal de la CIAT (cuadros verdes en la Figura 10). Las recomendaciones asociadas con los componentes correspondientes serán presentadas al GTECI, al CCA, y a la Comisión para su consideración y posible adopción (cuadros rojos en la Figura 10).

A continuación se describen con más detalle las fases y los componentes.

La primera fase (planificación), que ya está en marcha, contempla procesos educativos en los que el personal de la CIAT entablará discusiones con los Miembros y no Miembros Cooperantes (CPC) sobre los efectos potenciales del cambio climático sobre los peces y las especies y ecosistemas asociados, las pesquerías, sus comunidades, los proyectos en curso para evaluar estos efectos, y las herramientas disponibles para evaluar y mitigar los impactos climáticos. Además de presentar las investigaciones en curso que evalúan el efecto potencial del cambio climático en especies clave, esta fase proporcionará una revisión de las herramientas y marcos que están siendo utilizados por otros grupos y organizaciones nacionales e internacionales para promover pesquerías resilientes al clima, junto con una propuesta de plan de trabajo para recibir aportaciones por parte del GTECI, el CCA y, en última instancia, la Comisión, según sea necesario (es decir, el presente documento). En caso necesario, el personal también elaborará Términos de Referencia (TdR) para los próximos talleres dedicados a este tema.

La segunda fase consiste en la determinación del alcance, una etapa inicial crucial para todos los grupos que intentan desarrollar pesquerías resilientes al clima. Durante esta fase hay que responder a muchas preguntas: ¿Qué decisiones pretende respaldar este plan sobre el cambio climático? ¿Quién implementará el plan? ¿Cuáles son los objetivos de conservación, tales como especies, hábitats, pesquerías o comunidades? ¿Cuál es el alcance geográfico y temporal del plan? ¿Quiénes son los principales socios y partes interesadas y cómo participan? ¿De qué recursos se dispone y cómo se van a cubrir? Para responder a estas preguntas probablemente habrá que organizar y celebrar talleres sobre el cambio climático, además de las discusiones internas entre el personal, así como a nivel de la Comisión, incluyendo con las partes interesadas pertinentes. A medida que se desarrollen los próximos pasos, y aunque es importante y necesario contar con cierta base para el éxito del proceso, la definición del alcance requiere cierto grado de flexibilidad, incluida la necesidad de reevaluar para adaptarse al clima cambiante y satisfacer las necesidades, prioridades y requisitos en constante evolución de la Comisión.

Una vez abordadas las cuestiones de alcance, será necesario diseñar y aprobar un marco (Fase 3). Los resultados de las interacciones entre el personal de la CIAT y las partes interesadas (por ejemplo, los talleres) se presentarán en el GTECI, el CCA y la reunión anual de la Comisión para su consideración. Al igual que los marcos descritos en la Sección 4, se desarrollan múltiples herramientas de adaptación al cambio climático que se insertan en varios pasos dentro del marco. Existen dos tipos de herramientas: las estratégicas, que ayudan a los científicos y a los gestores a determinar las acciones que se emprenderán, y las tácticas, que abordan la manera de hacerlo. Las herramientas estratégicas y tácticas están relacionadas en el sentido de que ambas son aplicaciones utilizadas para apoyar el asesoramiento de ordenación, pero difieren en sus medios para hacerlo. Por ejemplo, una herramienta estratégica podría ser una evaluación de vulnerabilidad climática que sugiera que el tiburón punta blanca oceánico es muy vulnerable al cambio climático, por lo que a su vez es necesaria una mayor protección de esta especie. En consecuencia, una herramienta táctica podría ser el desarrollo de un área de ordenación espacial que mejorara la protección del tiburón punta blanca oceánico. La fase de desarrollo de herramientas (Fase 4) probablemente llevará más tiempo y es posible que requiera múltiples iteraciones de desarrollo de herramientas y discusiones a varios niveles, por lo que el calendario para esta fase está sujeto a cambios,

pero se estima aproximadamente en cuatro años. Se prevé la celebración de varios talleres dedicados a identificar y desarrollar herramientas con las aportaciones de las partes interesadas. Además de estos talleres, el personal científico de la CIAT trabajará para desarrollar herramientas estratégicas y tácticas que abordarán los pasos requeridos en el marco seleccionado. Los resultados de las herramientas se presentarán al GTECI, al CCA y a la Comisión, según proceda. Dependiendo del marco elegido, es posible que el desarrollo de herramientas se traslape con la última fase, en la que se aplican las herramientas tácticas y se implementan las acciones. Para identificar las posibles medidas de ordenación iniciales y futuras, se prevé la celebración de un taller en el que se intercambiarán y discutirán ideas con los Miembros. Los resultados de este posible taller también se presentarán en el GTECI, el CCA y la reunión anual de la Comisión para su consideración y posible adopción como primera acción de ordenación para promover pesquerías resilientes al clima. El personal de la CIAT anticipa que algunos de estos procesos serán iterativos, y que los esfuerzos se extenderán más allá de 2028 para dar cabida a futuras acciones de ordenación que tengan en cuenta el cambio climático.

6. TABLAS

Fase	Actividades	2024				2025				2026				2027				2028				2029			
		T1	T2	T3	T4																				
1) Planificación	Revisión y presentación de los marcos y herramientas disponibles																								
	Desarrollo de un documento informativo de revisión y propuesta de plan de trabajo																								
	Reunión CCA/Comisión: Compartir recursos y propuesta sobre cambio climático con los Miembros																								
	Establecimiento de Términos de Referencia (TdR) para los talleres sobre cambio climático																								
2) Decisión sobre el alcance y los objetivos	Taller para definir el alcance																								
	Reunión CCA/Comisión: Compartir/adoptar el alcance																								
3) Desarrollo de un marco	Taller para desarrollar el marco																								
	Reunión CCA/Comisión: Compartir/adoptar el marco																								
4) Creación de herramientas	Desarrollo de herramientas estratégicas																								
	Taller para compartir y desarrollar herramientas estratégicas																								
	Desarrollo de herramientas tácticas																								
	Reunión CCA/Comisión: Presentación de las nuevas herramientas estratégicas																								
	Taller para compartir y desarrollar herramientas estratégicas y tácticas																								
	Reunión CCA/Comisión: Presentación de las nuevas herramientas estratégicas y tácticas																								
	Taller para identificar herramientas tácticas y medidas de ordenación																								
5) Implementación de herramientas	Reunión CCA/Comisión: Recomendación de implementación de herramientas/medidas de ordenación																								
	Implementación																								

TABLE 1. Timetable of activities for the proposed workplan. The timeframe is flexible, often iterative, and subject to change.

TABLA 1. Calendario de actividades del plan de trabajo propuesto. El calendario es flexible, a menudo iterativo y está sujeto a cambios.

7. FIGURAS

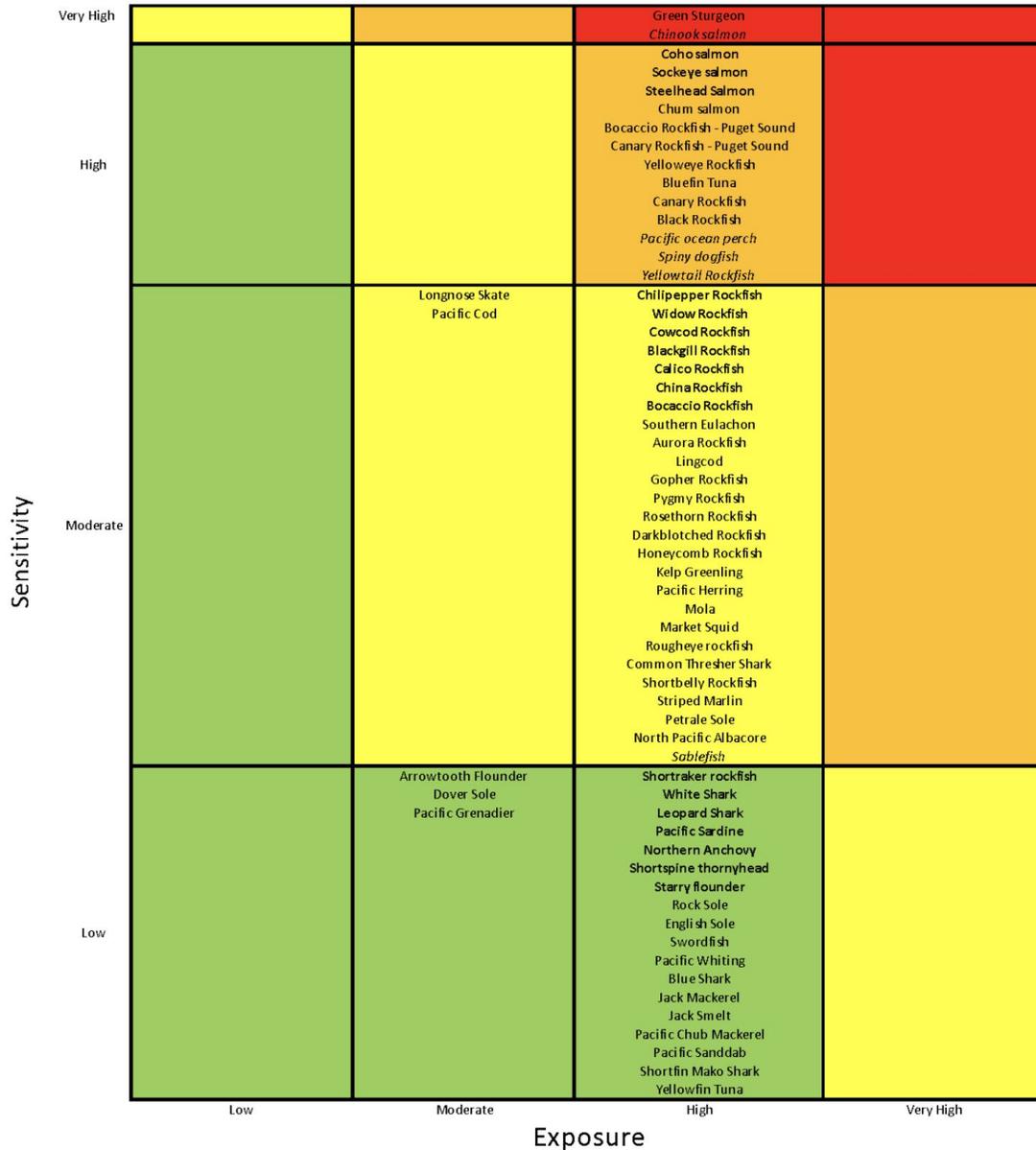


FIGURE 1. Vulnerability categorization for California Current large marine ecosystem (LME) species. Vulnerability categories are colored from green (Low) to red (Very High). Species or stocks in **bold** had a >25% chance of being placed in the next highest vulnerability category in the bootstrap analysis; those in *italics* had a >25% chance of being placed in the next lowest vulnerability category in that analysis. From McClure et al. (2023).

FIGURA 1. Categorización de la vulnerabilidad de las especies del gran ecosistema marino (GEM) de la Corriente de California. Las categorías de vulnerabilidad están coloreadas de verde (baja) a rojo (muy alta). Las especies o poblaciones en **negritas** tuvieron una probabilidad de >25% de ser colocadas en la siguiente categoría de vulnerabilidad más alta en el análisis de *bootstrap*; las que aparecen en *cursiva* tuvieron una probabilidad de >25% de ser colocadas en la siguiente categoría de vulnerabilidad más baja en dicho análisis. Tomada de McClure *et al.* (2023).

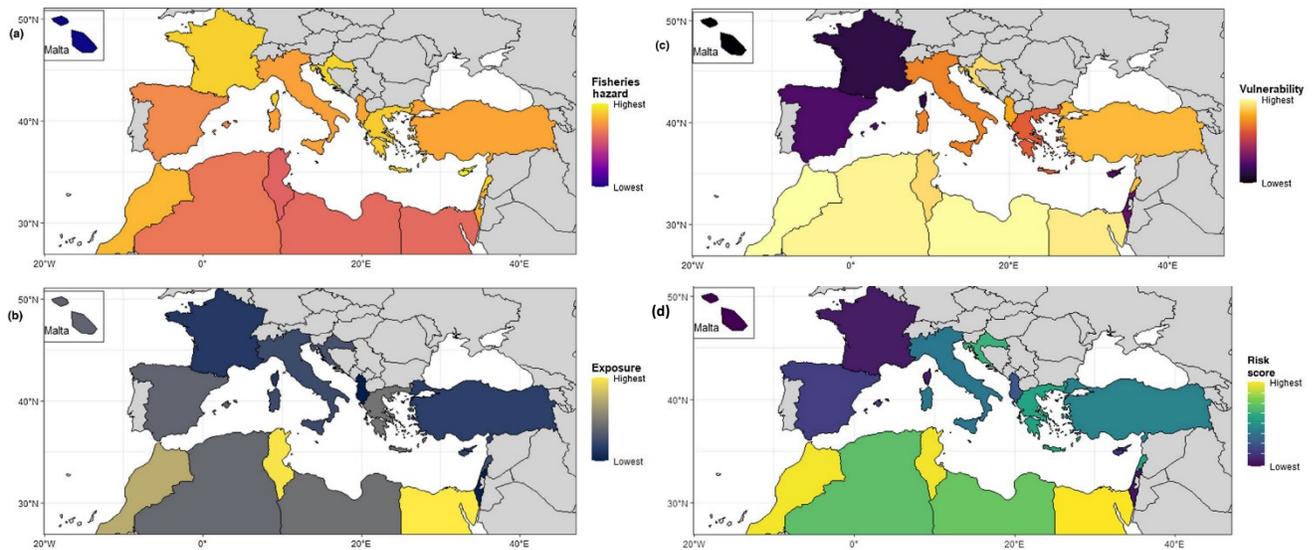


FIGURE 2. Adapted from Pita et al. (2021). Geographical distribution of the 16 studied Mediterranean countries for the three components of fisheries risk: (a) fisheries hazard, (b) exposure, and (c) vulnerability. Combining the three components resulted in the (d) fisheries risk scores amongst the 16 studied countries under the RCP8.5 climate change scenario by 2050.

FIGURA 2. Adaptada 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 dio como resultado las puntuaciones de riesgo pesquero (d) entre los 16 países estudiados en el escenario de cambio climático RCP8.5 para 2050.

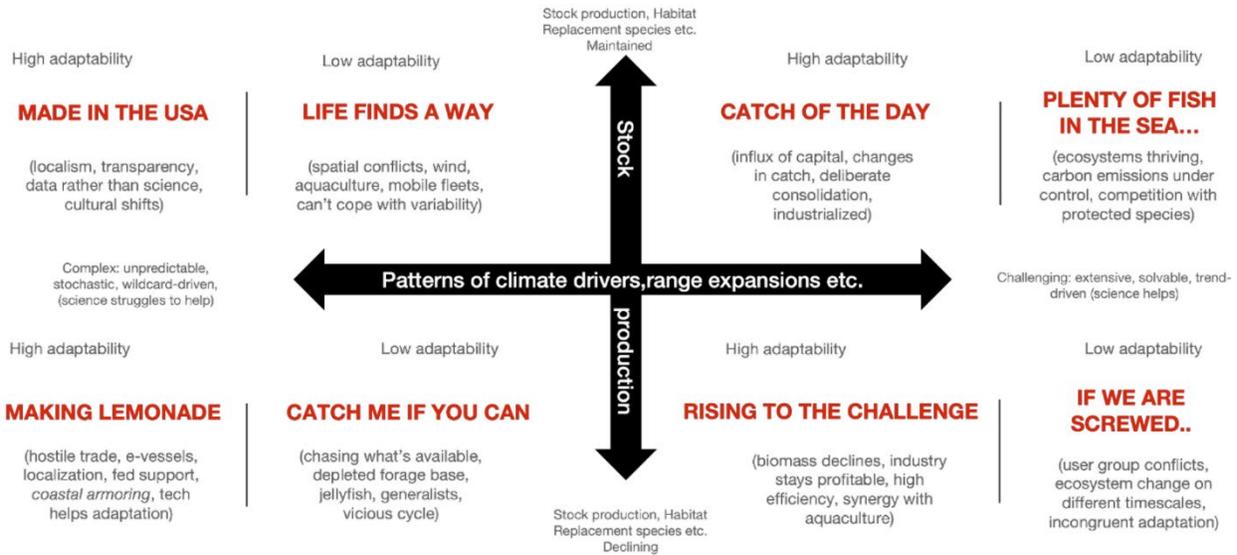


FIGURE 3. The scenarios created during the first workshop from three uncertainty axes: health of stock productivity, predictability of change in ocean conditions and species distribution, and adaptability of the industry, from MAFMC (2023).

FIGURA 3. Los escenarios creados durante el primer taller a partir de tres ejes de incertidumbre: salud de la productividad de la población, previsibilidad del cambio en las condiciones oceánicas y la distribución de las especies, y adaptabilidad de la industria, de MAFMC (2023).

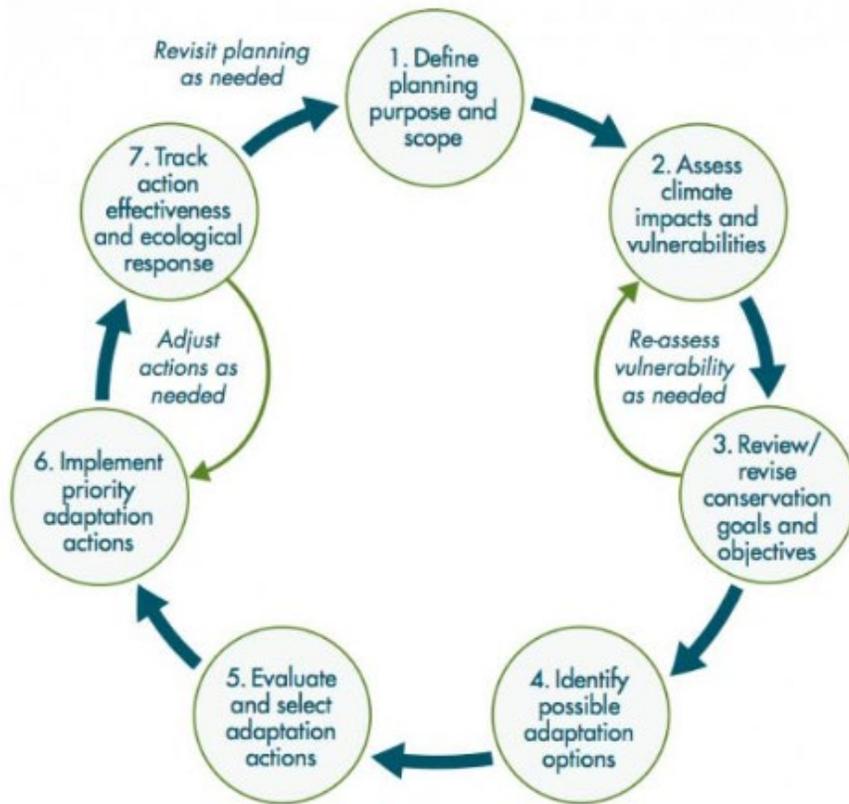


FIGURE 4. The Climate-Smart Conservation Cycle, a general framework for adaptation planning and implementation.

FIGURA 4. El ciclo de conservación climáticamente inteligente, un marco general para la planificación e implementación de la adaptación.



FIGURE 5. FISHE's (<https://fishe.edf.org/>) 11-step framework to promote sustainable fisheries under climate change.

FIGURA 5. Marco de 11 pasos de FISHE (<https://fishe.edf.org/>) para promover pesquerías sostenibles ante el cambio climático.

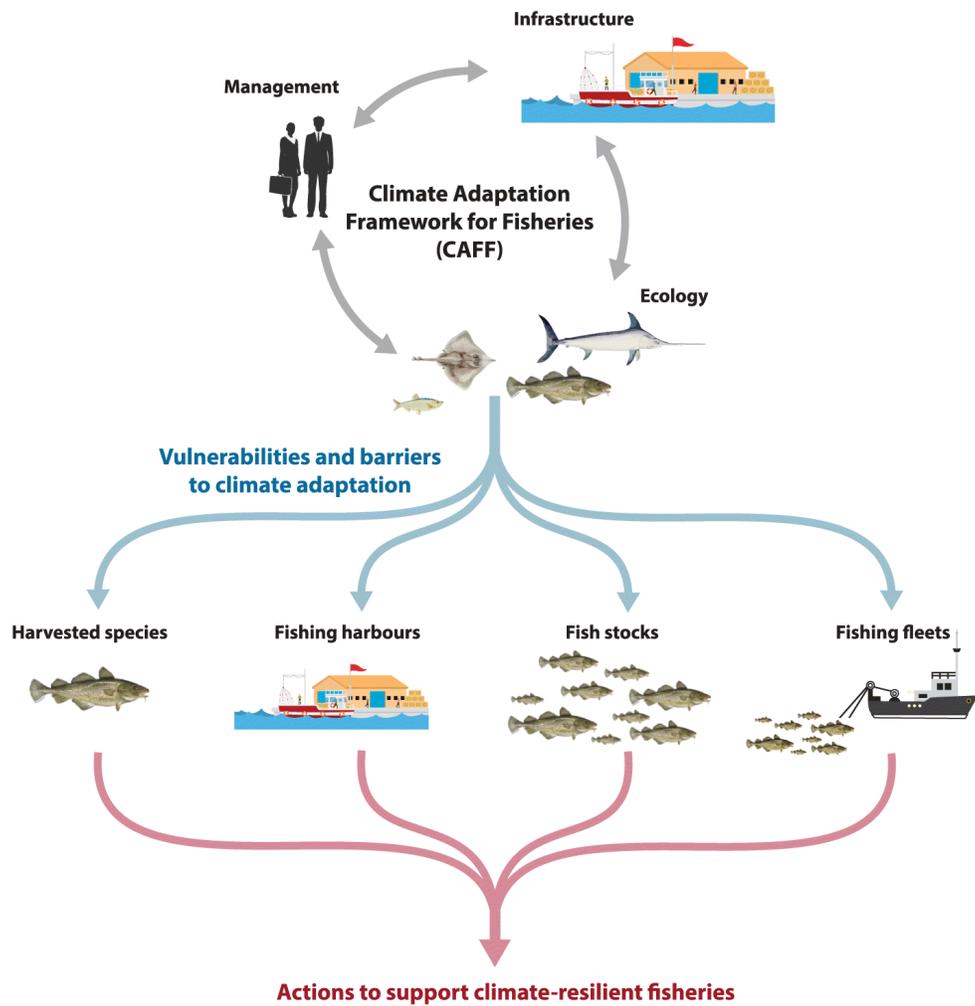


FIGURE 6. The graphic abstract describing CAFF from Boyce et al. (2023).
FIGURA 6. Resumen gráfico que describe el CAFF de Boyce *et al.* (2023).



FIGURE 7. The structure of the Climate Adaptation Handbook from Fulton et al. (2020).

FIGURA 7. Estructura del Manual de adaptación al cambio climático de Fulton *et al.* (2020).

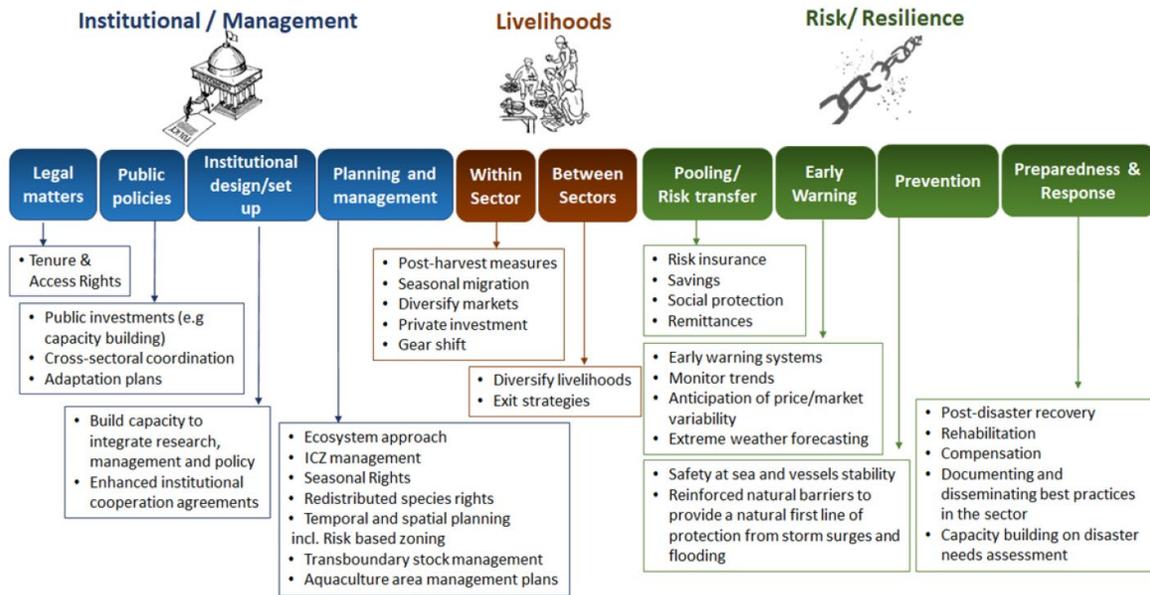


FIGURE 8. Types and selected examples of adaptation tools and approaches in capture fisheries from Barange et al. (2018).

FIGURA 8. Tipos y ejemplos de enfoques y herramientas de adaptación en pesquerías de captura, tomada de Barange *et al.* (2018).

#	Good practice adaptation measure	Reference	Climate impact(s) on fisheries resources addressed	Page no.
1	Enhance monitoring programmes through community-based approaches	Defeo <i>et al.</i> (this volume); Fogarty and Pecl (this volume)	Distributional change; productivity change; species composition change	40
2	Incorporate environmental variables and risk into fisheries assessment and management advice	Clarke <i>et al.</i> (this volume); Duplisea <i>et al.</i> (this volume); Grant <i>et al.</i> (this volume); Sharma <i>et al.</i> (this volume)	Distributional change; productivity change	42
3	Adjust spatial scale of monitoring to be responsive to shifting stocks	Hollowed and Sundby (2014); Watson and Haynie (2018); Sharma <i>et al.</i> (this volume)	Distributional change	45
4	Establish early warning systems for extreme events	Defeo <i>et al.</i> (this volume)	Distributional change; productivity change; species composition change	47
5	Apply flexible and adaptable fishing seasons	Defeo <i>et al.</i> (this volume)	Productivity change	50
6	Apply tradable fishing rights/allocations to allow flexibility in response to stocks shifting across international borders	Clarke <i>et al.</i> (this volume)	Distributional change	52
7	Close fishery during climate-driven events to support resilience and recovery	Caputi <i>et al.</i> (2019); Defeo <i>et al.</i> (this volume)	Productivity change	55
8	Apply in-season management systems that are responsive to rapid climate-driven stock changes	Caputi <i>et al.</i> (2019); Clarke <i>et al.</i> (this volume); Defeo <i>et al.</i> (this volume); Fogarty and Pecl (this volume); Grant <i>et al.</i> (this volume); Oliveros-Ramos <i>et al.</i> (this volume); Sharma <i>et al.</i> (this volume)	Productivity change; distributional change; species composition change	58
9	Relocate fishery species to compensate for changes in productivity	Fogarty and Pecl (this volume)	Productivity change	61
10	Conserve keystone species complexes to avoid ecological tipping points and related changes in target species abundance	McClanahan <i>et al.</i> (2012, 2015); Karr <i>et al.</i> (2015); Steneck, <i>et al.</i> (2019);	Productivity change; distributional change; species composition change	63
11	Relocate landing and processing practices	Fogarty and Pecl (this volume); van der Lingen (this volume)	Distributional change; productivity change; species composition change	65
12	Develop new fishery opportunities to capitalize on distributional shifts or enhanced productivity (including for 'new' species)	Fogarty and Pecl (this volume); Gücü <i>et al.</i> (this volume); van der Lingen (this volume)	Distributional change; productivity change; species composition change	67
13	Source more diverse supplies of seafood for processing facilities	van der Lingen (this volume)	Distributional change; species composition change	70
14	Develop new products and markets to maximize fishery value as catches decline	Defeo <i>et al.</i> (this volume); van der Lingen (this volume)	Distributional change; productivity change; species composition change	72
15	Develop insurance schemes that protect fishers against loss and damage after climate events or due to 'forced' practice changes or exit from the industry	Pongthanapanich <i>et al.</i> (2019)	Distributional change; productivity change; species composition change	74

FIGURE 9. Summary of good practice adaptation measures described by Bahri *et al.* (2021) from the case studies and selected literature and the main climate-related impacts on fisheries they address.

FIGURA 9. Resumen de buenas prácticas de medidas de adaptación descritas por Bahri *et al.* (2021) a partir de estudios de caso y bibliografía seleccionada, así como los principales impactos relacionados con el clima en las pesquerías.

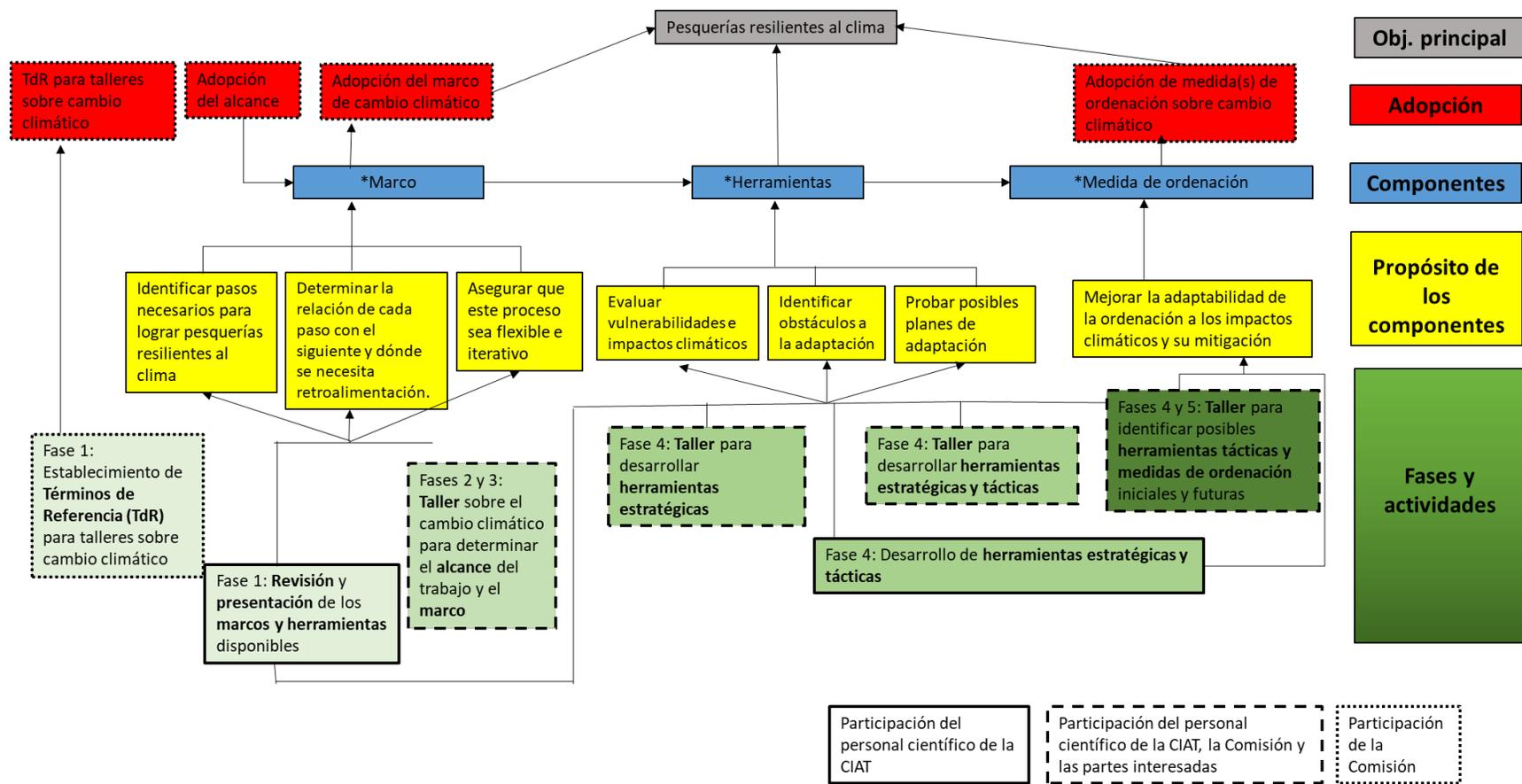


FIGURE 10. The proposed workplan for the implementation of climate-resilient fisheries for IATTC. The five phases that correspond to the chronogram are as follows: 1) Planning; 2) Deciding on scope and goals; 3) Developing a framework; 4) Creating tools; 5) Tool implementation. * indicates that each component is iterative, meaning adjustments and improvements can be made as climate changes, more data are collected, and management needs shift. Therefore, the framework may need to change, additional workshops may need to be conducted, and new tools may need to be developed.

FIGURA 10. El plan de trabajo propuesto para la implementación de pesquerías resilientes al clima para la CIAT. Las cinco fases del cronograma son las siguientes: 1) Planificación; 2) Decisión sobre el alcance y los objetivos; 3) Desarrollo de un marco; 4) Creación de herramientas; 5) Implementación de herramientas. Los * indican que cada componente es iterativo, lo que significa que pueden introducirse ajustes y mejoras a medida que cambia el clima, se recolectan más datos y cambian las necesidades de ordenación. Por lo tanto, es posible que haya que modificar el marco, organizar más talleres y desarrollar nuevas herramientas.

8. REFERENCIAS

- A'mar, Z. T., A. E. Punt, and 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.
- Bahri, T., M. Vasconcellos, D. J. Welch, J. Johnson, R. I. Perry, X. Ma, and R. Sharma. 2021. Adaptive management of fisheries in response to climate change. Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 667, FAO, Rome.
- Barange, M., T. Bahri, M. C. M. Beveridge, K. L. Cochrane, S. Funge-Smith, and F. Poulain. 2018. Impacts of climate change on fisheries and aquaculture: synthesis of current knowledge, adaptation and mitigation options. Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 627, FAO, Rome.
- 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, and 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.
- Boyce, D. G., N. Shackell, P. Greyson, and 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, and 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, and T. H. Curtis. 2023. Widespread habitat loss and redistribution of marine top predators in a changing ocean. *Science Advances* **9**:eadi2718.
- Carroll, G., J. G. Eurich, K. D. Sherman, R. Glazer, M. T. Braynen, K. A. Callwood, A. Castañeda, C. Dahlgren, K. A. Karr, and 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, and 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, and M. A. Coleman. 2023. Multi-criteria analysis for rapid vulnerability assessment of marine species to climate change. *Climatic change* **176**:99.
- Crear, D. P., B. E. Watkins, V. S. Saba, J. E. Graves, D. R. Jensen, A. J. Hobday, and K. C. Weng. 2020. 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, and 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, and K. Kleisner. 2023. Effects of climate change and variability on large pelagic fish in the Northwest Atlantic Ocean: Implications for improving climate resilient management for pelagic longline fisheries. *Frontiers in Marine Science* **10**:1206911.
- Erauskin-Extramiana, M., H. Arrizabalaga, A. J. Hobday, A. Cabré, L. Ibaibarriaga, I. Arregui, H. Murua, and G. Chust. 2019. Large-scale distribution of tuna species in a warming ocean. *Global Change Biology* **25**:2043-2060.

- 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, and 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, and R. R. Hood. 2015. Chesapeake Bay nitrogen fluxes derived from a land-estuarine ocean biogeochemical modeling system: Model description, evaluation, and nitrogen budgets. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* **120**:1666-1695.
- Fulton, E., E. van Putten, L. Dutra, J. Melbourne-Thomas, E. Ogier, L. Thomas, R. Murphy, I. Butler, D. Ghebregabghier, A. Hobday, and N. Rayns. 2020. *Adaptation of fisheries management to climate change Handbook*. CSIRO, Australia.
- Gammage, L. C., and A. Jarre. 2021. Scenario-Based approaches to change management in fisheries can address challenges with scale and support the implementation of an ecosystem approach to fisheries management. *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, and J. M. O'Malley. 2022. Assessing the vulnerability of marine life to climate change in the Pacific Islands region. *PLoS ONE* **17**:e0270930.
- Haltuch, M. A., Z. T. A'mar, N. A. Bond, and 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, and R. J. Bell. 2016. A vulnerability assessment of fish and invertebrates to climate change on the Northeast US Continental Shelf. *PLoS ONE* **11**:e0146756.
- 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, and 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, and H. Dewar. 2018. A dynamic ocean management tool to reduce bycatch and support sustainable fisheries. *Science Advances* **4**:eaar3001.
- Hinton, M. G. 1996. Standardizing catch and effort statistics using physiological, ecological, or behavioral constraints, and environmental data, with applications to blue marlin (*Makaira nigricans*) and swordfish (*Xiphias gladius*) of the Pacific Ocean. University of California, San Diego.
- Hobday, A. J., and K. Hartmann. 2006. Near real-time spatial management based on habitat predictions for a longline bycatch species. *Fisheries Management and Ecology* **13**:365-380.
- Hobday, A. J., J. R. Hartog, C. M. Spillman, O. Alves, and R. Hilborn. 2011. Seasonal forecasting of tuna habitat for dynamic spatial management. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **68**:898-911.
- Howell, E. A., A. Hoover, S. R. Benson, H. Bailey, J. J. Polovina, J. A. Seminoff, and P. H. Dutton. 2015. Enhancing the TurtleWatch product for leatherback sea turtles, a dynamic habitat model for ecosystem-based management. *Fisheries Oceanography* **24**:57-68.
- 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., and 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, and 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. Fossheim, and C. Thorsen Broma. 2022. Highly mixed impacts of near-future climate change on stock productivity proxies in the North East Atlantic. *Fish and Fisheries* **23**:601-615.
- Koubrak, O., and D. VanderZwaag. 2020. Are transboundary fisheries management arrangements in the Northwest Atlantic and North Pacific seaworthy in a changing ocean? *Ecology and Society* **25**.
- Lee, H.-H., K. R. Piner, M. N. Maunder, I. G. Taylor, and 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, and R. Murtugudde. 2008. A spatial ecosystem and populations dynamics model (SEAPODYM)—Modeling of tuna and tuna-like populations. *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, and 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, and 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, and 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, and Y. Chen. 2023. A global synthesis of climate vulnerability assessments on marine fisheries: methods, scales and knowledge co-production. *Global Change Biology*.
- Lynch, P. D., R. D. Methot, and J. S. Link. 2018. Implementing a Next Generation Stock Assessment Enterprise. An Update to the NOAA Fisheries Stock Assessment Improvement Plan. NOAA Tech Memo NMFS-F/SPO-183, U.S. Dep. Commer., NOAA Tech. Memo.
- MAFMC. 2023. East Coast Climate Change Scenario Planning. Mid-Atlantic Fisheries Management Council, Dover, DE.
- Maunder, M. N., and 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., and M. G. Hinton. 2006. Estimating relative abundance from catch and effort data, using neural networks.
- Maunder, M. N., M. G. Hinton, K. A. Bigelow, and 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., and G. M. Watters. 2003. A general framework for integrating environmental time series into stock assessment models: model description, simulation testing, and example.
- 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, and 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, and 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., and 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, and 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.
- Pepin, P., J. King, C. Holt, H. Gurney-Smith, N. Shackell, K. Hedges, and 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, and S. R. Carpenter. 2003. Scenario planning: a tool for conservation in an uncertain world. *Conservation Biology* **17**:358-366.
- Pinsky, M. L., G. Reygondeau, R. Caddell, J. Palacios-Abrantes, J. Spijkers, and W. W. Cheung. 2018. Preparing ocean governance for species on the move. *Science* **360**:1189-1191.
- Pita, I., D. Mouillot, F. Moullec, and Y. J. Shin. 2021. Contrasted patterns in climate change risk for Mediterranean fisheries. *Global Change Biology* **27**:5920-5933.
- Pons, M., J. T. Watson, D. Ovando, S. Andraka, S. Brodie, A. Domingo, M. Fitchett, R. Forselledo, M. Hall, and E. L. Hazen. 2022. Trade-offs between bycatch and target catches in static versus dynamic fishery closures. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **119**.
- 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, and 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, and 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, and 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.
- 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, and 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.
- SEDAR. 2019. SEDAR 61 - Gulf of Mexico Red Grouper Stock Assessment Report. Page 285. SEDAR, North Charleston.
- Smith, J. A., D. Tommasi, H. Welch, E. L. Hazen, J. Sweeney, S. Brodie, B. Muhling, S. M. Stohs, and M. G. Jacox. 2021. Comparing dynamic and static time-area closures for bycatch mitigation: a management strategy evaluation of a swordfish fishery. *Frontiers in Marine Science* **8**:630607.
- Spencer, P. D., A. B. Hollowed, M. F. Sigler, A. J. Hermann, and 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.
- Stein, B. A., N. E. Glick, and A. Staudt. 2014. Climate-Smart Conservation: Putting Adaptation Principles into Practice. National Wildlife Federation, Washington, D.C.
- Sumaila, U. R., J. Palacios-Abrantes, and W. W. Cheung. 2020. Climate change, shifting threat points, and the management of transboundary fish stocks. *Ecology & Society* **25**.
- Tommasi, D., C. A. Stock, K. Pegion, G. A. Vecchi, R. D. Methot, M. A. Alexander, and 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, and Y. Chen. 2016. Stock assessment for the western winter-spring cohort of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) using environmentally dependent surplus production models. *Scientia Marina* **80**:69-78.
- Williams, S. E., L. P. Shoo, J. L. Isaac, A. A. Hoffmann, and G. Langham. 2008. Towards an integrated framework for assessing the vulnerability of species to climate change. *PLoS Biology* **6**:e325.