



Organización de las Naciones
Unidas para la Alimentación
y la Agricultura

Núcleo de Capacitación
en Políticas Públicas

Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe



Unidad

1

Curso de autoaprendizaje:

**Ordenamiento pesquero
con enfoque ecosistémico**

**Fundamentos de biología pesquera
y dinámica poblacional**

iniciativa
AMÉRICA LATINA Y CARIBE
SIN HAMBRE





Índice

Introducción	03
Inicio de la ciencia pesquera	04
Los sistemas pesqueros	07
Bases científicas para la gestión	11
Definición de stock	11
Elección de procedimientos de recopilación de datos	11
Elección de un modelo de evaluación. Evaluación de stock y sus parámetros	12
Evaluación de acciones alternativas y especificación de indicadores de desempeño	17
Presentación de resultados	18
Puntos de referencia biológicos para el manejo y conservación de los recursos pesqueros	20
Conclusión	21
Referencias	22

Introducción

La pesca desempeña un rol importante en el suministro de alimentos, ingresos, empleo y en la cultura en todo el mundo. Vincular las actividades pesqueras con las fluctuaciones naturales para evitar capturas insostenibles y colapsos de las poblaciones se ha convertido en una meta global.

La pesca desempeña un rol importante en un mundo ideal, estimaciones exactas y precisas de la abundancia de las poblaciones de peces y su dinámica, estarían disponibles para establecer niveles de captura sostenibles para satisfacer la demanda comercial y recreativa.

Pero la realidad es diferente, la ordenación pesquera se basa en una estimación imperfecta del número, de la biomasa, productividad y estructura de edad de las poblaciones de peces y en un conocimiento incompleto de la dinámica de las poblaciones.

Por lo tanto...

Es difícil “contar” peces a través de medios no destructivos (los peces generalmente deben ser capturados para contarlos, pesarlos y medirlos). Se han desarrollado técnicas estandarizadas para muestrear una proporción relativamente pequeña de peces de una población y combinar dichos datos con información de captura comercial y recreativa para estimar las características de las poblaciones. Sin evaluaciones precisas de las poblaciones y su uso adecuado en el manejo, las poblaciones de peces explotadas pueden colapsar, creando graves problemas económicos, sociales y ecológicos.

Entonces:

Para garantizar la sostenibilidad de las pesquerías, es fundamental asegurar que la investigación de la evaluación del stock progrese y que las evaluaciones operativas del stock utilicen las mejores técnicas para un stock determinado.



Inicio de la ciencia pesquera

La ciencia pesquera es un tema multidisciplinario que integra:

- El comportamiento animal
- La ecología
- La dinámica de la población con los procesos ambientales

Para predecir cómo las poblaciones responden a la mortalidad por pesca.

Los resultados de la ciencia pesquera informan la gestión pesquera, mediante la cual las políticas se implementan para cumplir con los objetivos específicos establecidos por diversos interesados, desde pescadores hasta consumidores y conservacionistas.

(Hart y Reynolds 2008)

Evolución de la ciencia pesquera:

1850

La ciencia pesquera ha sido reconocida como una disciplina científica desde 1850, cuando científicos noruegos descubrieron por qué las capturas de bacalao del Atlántico fluctuaban año con año (Smith, 1994).

1883

Pronto, los científicos estaban cada vez más preocupados de que las fluctuaciones en la abundancia de las poblaciones pudieran ser impulsadas por la pesca. En la Gran Exposición Internacional de Pesca (Inglaterra 1883), Thomas Huxley declaró que “la pesca del bacalao, la pesca del arenque y probablemente todas las grandes pesquerías marinas son inagotables; es decir, que nada de lo que hagamos afecta seriamente el número de peces”. Su declaración se usa a menudo para sugerir que la gente generalmente no estaba al tanto de los límites finitos de los recursos naturales en ese momento. Pero muchos pescadores en Europa habían informado una disminución de las tasas de captura. Decenas de generaciones de personas que dependían de los recursos de peces de arrecife de las islas tropicales eran muy conscientes de que no podían sostener una captura intensiva y se vieron obligados a mudarse a nuevas islas a medida que agotaban las poblaciones de peces. Así, hubo un creciente consenso científico de que se necesitaba investigación para identificar los efectos de la pesca (Hart y Reynolds 2008).

1899

A fines del siglo XIX, los científicos habían desarrollado técnicas para calcular la edad de los peces y marcarlos para seguir sus migraciones, pero no habían demostrado por qué variaban las capturas. Los esfuerzos de investigación se centraron en si capturar peces pequeños, antes de que pudieran desovar, provocaría la disminución de las capturas, si la pesca afectaba el tamaño y la abundancia de peces, y qué se podía aprender de la recopilación y análisis de los datos de captura y esfuerzo de la pesquería (Hart y Reynolds 2008).

1900

En los años siguientes, la ciencia pesquera desempeñaría un papel de liderazgo en el campo de la ecología en su conjunto, describiendo por qué las poblaciones fluctúan y cómo cambia la estructura

de la población en el espacio, tiempo y en respuesta a las mayores tasas de mortalidad impuestas por los humanos (Jennings, Kaiser, y Reynolds 2001).

La pesca no es estática

Las pesquerías se desarrollan, algunas poblaciones de peces colapsan, algunos pescadores se enriquecen, otros pescadores se declaran en bancarrota y se trasladan a otros lugares y a otros trabajos, etc. Una evaluación de numerosas pesquerías en todo el mundo muestra que cuando se descubre un recurso con potencial desarrollo, los nuevos pescadores comienzan a explorar su potencial y comienzan la explotación lo antes posible. De hecho, de forma individual, cuanto más rápido puedan explotar el nuevo recurso más ingresos recibirán.

Eventualmente, habrá demasiados pescadores persiguiendo muy pocos peces, las poblaciones (stock) se agotarán y las tasas de captura y ganancias disminuirán (Hilborn y Walters 1992). Los pescadores pueden explotar las pesquerías a tasas que exceden su capacidad. A medida que esto ocurre, la pesquería pasa por una serie de fases (Fig. 1) (Hilborn y Walters 1992; Jennings et al. 2001).

Las ciencias tradicionales que se han utilizado habitualmente en las investigaciones pesqueras incluyen estudios sobre el ambiente acuático, identificación y biología de los organismos, y estudios sobre el rol ecológico de los recursos. La medición y predicción de los cambios son actividades importantes de los científicos pesqueros que se preocupan por las poblaciones de peces silvestres y su gestión. Ellos han jugado un rol importante en el manejo pesquero desde su comienzo, han evaluado el estado de las poblaciones y predicho las consecuencias de diferentes patrones e intensidades de explotación (Royce, 1996).

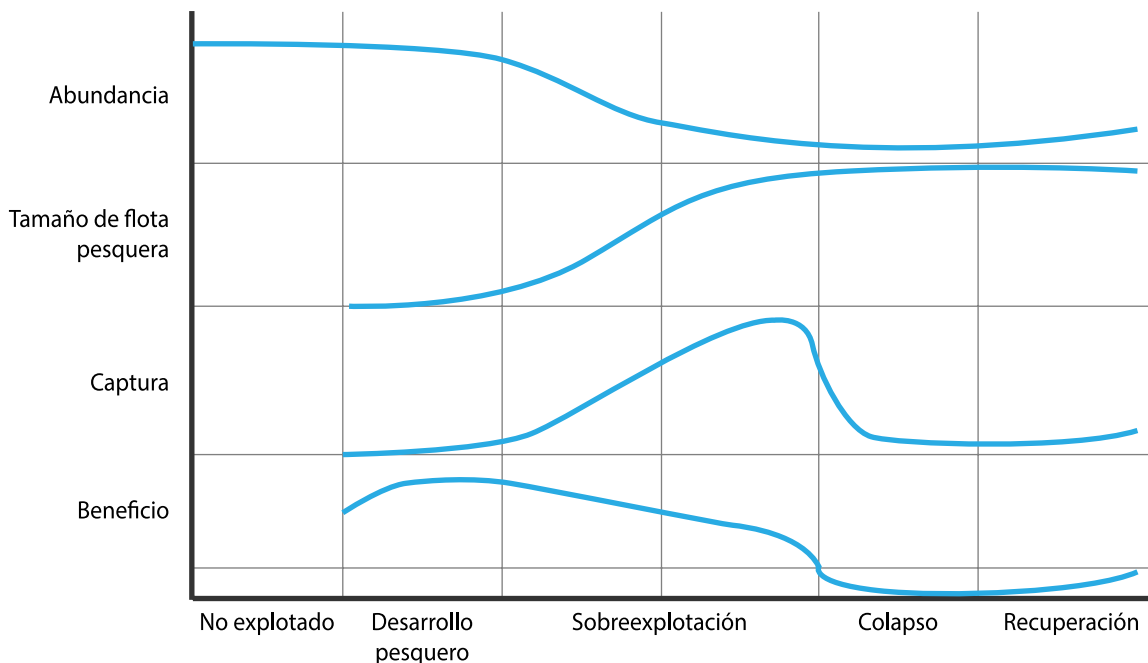


Figura 1. Fases de desarrollo de una pesquería (Jennings et al. 2001).

Explotación total

La captura total aumentará a medida que aumente el esfuerzo de pesca. Durante la fase totalmente explotada, el reclutamiento es suficiente para mantener la producción del recurso y, por lo tanto, las capturas.



Desarrollo pesquero

A medida que se desarrolla una nueva pesquería, más pescadores o botes ingresan a la pesquería porque les resulta rentable hacerlo. Los pescadores que comienzan a pescar primero, o capturan la mayoría con el menor esfuerzo, obtendrán el mayor beneficio. Durante el desarrollo de la pesca, los efectos de la pesca se ven como una ligera reducción en las tasas de captura y en el tamaño de los individuos en la captura.

Sobreexplotación

Pero si entran más pescadores a la pesquería, su capacidad de captura excederá la tasa de reclutamiento. Esto generalmente conduce a una caída en las ganancias porque más pescadores están compitiendo por un recurso cada vez menor. Como las ganancias tienden a cero, los pescadores dejan de ingresar a la pesquería. La captura total alcanzará su punto máximo cerca del momento en que el número de pescadores alcance un máximo, y posteriormente disminuirá a medida que la abundancia y la capacidad de reposición se reduzcan.

Colapso

Si el esfuerzo de pesca no se reduce, la pesquería finalmente colapsará, con caídas en abundancia y captura. Después del colapso, la pesquería ya no será rentable.

Recuperación

Si los pescadores pueden darse el lujo de abandonar la pesquería, por lo general lo harán, y teóricamente puede comenzar la recuperación y reconstrucción de la biomasa del stock.

Los sistemas pesqueros

El sistema pesquero se puede dividir en tres subsistemas que interactúan:

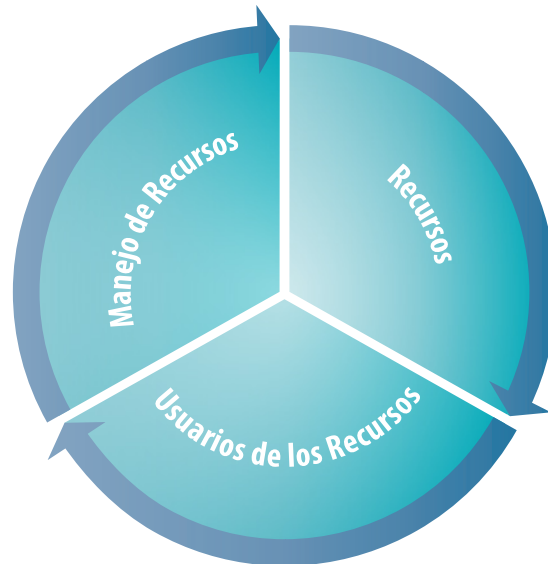
Recursos

El subsistema de recursos incluye:

- El ciclo de vida de una especie (incluyendo biología reproductiva, reclutamiento, crecimiento y mortalidad).
- Factores ambientales que afectan la abundancia y la distribución espacio-temporal de la especie.
- Interdependencias ecológicas.

Usuarios de los recursos

El subsistema de usuarios de los recursos incluye las embarcaciones de operación en la pesquería, su dinámica espacial, la composición de la captura (incluyendo las diferentes especies o componentes poblacionales, selectividad), y funciones económicas.



Manejo de recursos

El manejo de recursos captura toda la dinámica compleja de los dos primeros subsistemas más las fuerzas externas, como los mercados, la política y los intereses sociales. También considera formas de intervención, desarrollo institucional, criterios de selección de estrategias de manejo, mecanismos de aplicación y la forma de enfrentar múltiples criterios en la selección de instrumentos de manejo (McClanahan y Castilla 2007).

Estos subsistemas tienen condiciones que cambian de una pesquería a otra y de un lugar a otro (incluso dentro de una sola pesquería).

La naturaleza intrínseca del sistema de pesca varía de acuerdo con diferentes historias de vida, prácticas de captura y opciones de manejo. Por lo tanto, la interacción de los tres subsistemas produce el comportamiento único del sistema en general (Castilla y Defeo 2001).

Los recursos pesqueros tienen tres características importantes (Fig. 2).

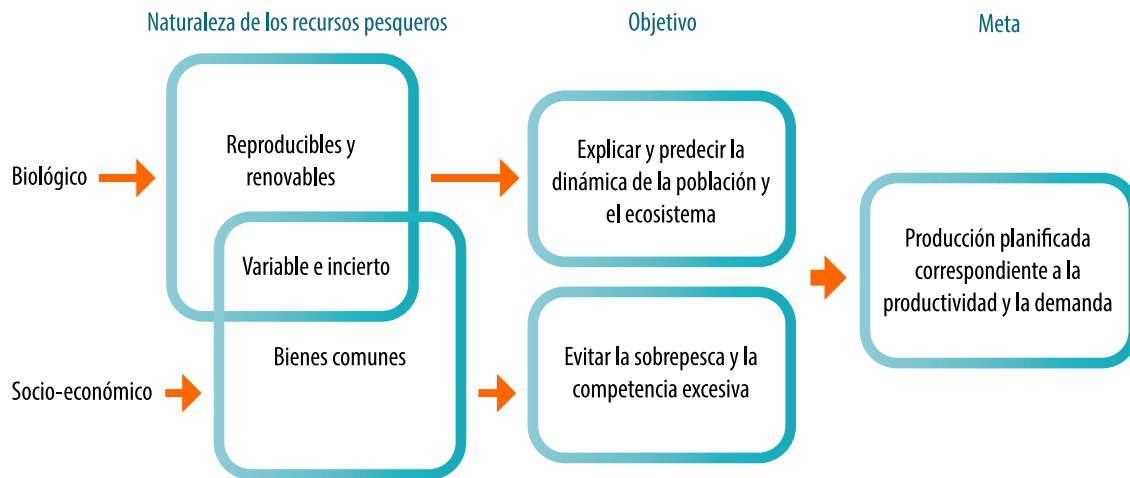


Figura 2. Naturaleza de los recursos pesqueros y su explotación sustentable. Modificado de Aoki et al. 2018.

Las poblaciones de peces son recursos reproducibles y renovables que pueden aumentar en abundancia por reproducción y disminuir por mortalidad. Las poblaciones de peces poseen naturalmente una alta capacidad de renovación y capacidad de restauración, aunque se impone un límite de capacidad de carga. La optimización de esta función biológica de reproducción conduce a una utilización eficiente y sostenible de los recursos pesqueros (Aoki et al. 2018).

Las poblaciones de peces muestran variabilidad inherente e incertidumbre en el espacio y tiempo. La alta fecundidad de los peces asegura una alta renovabilidad en las poblaciones y, por otro lado, es la causa de la gran variabilidad en la abundancia. La abundancia y la distribución de las poblaciones de peces están bajo la influencia de la variabilidad oceánica y climática. Los recursos pesqueros son renovables, pero están sujetos a grandes cambios impredecibles. Esta incertidumbre es el punto clave del manejo pesquero y una posible causa de sobrepesca.

Los peces en el mar antes de ser capturados no tienen dueño, cosas comunes de las cuales nadie tiene los derechos de propiedad, mientras que el esfuerzo de pesca o la cantidad de captura se puedan regular. Esta característica lleva a los pescadores a la competencia y conduce a la sobrepesca. A diferencia de las anteriores características, que se basan en procesos biológicos, esta es un problema socioeconómico que puede resolverse mediante cambios en el comportamiento humano (Aoki et al. 2018).

La mayoría de los pescadores, en cualquier parte del mundo, saben que la pesca no es tan buena como solía ser. Durante los primeros años de desarrollo de la pesca, sus capturas fueron mayores, capturando peces más grandes, y tenían una alta captura de peces con alto valor económico.

Ellos han visto que ha incrementado el número de pescadores y la captura total, pero no la captura por persona. El resultado de esto es la preocupación por la disminución de los recursos (Royce, 1996).

De esta preocupación surgen preguntas básicas sobre el uso de los recursos pesqueros.

- ¿Cuáles son las causas de los cambios en la abundancia de las poblaciones de peces?
- ¿Las fluctuaciones naturales están más allá del control humano?
- ¿Podemos pronosticar su abundancia para aprovechar al máximo los períodos de abundancia y proteger a las poblaciones durante los períodos de escasez?
- ¿La disminución es causada por la pesca o por una combinación de factores pesqueros y ambientales?

Para ello:

- ¿Cuál es la mejor estrategia de pesca?
- ¿Cómo se puede controlar el ambiente para mejorar la pesca o preservar una especie amenazada?

Después de que Hjort (1914) propusiera que las poblaciones de peces están reguladas por el éxito de supervivencia durante la primera etapa de vida. Se han realizado estudios para comprender los mecanismos que regulan la dinámica de las poblaciones en el ecosistema marino. Aunque el motivo principal ha sido predecir las tendencias futuras de la dinámica de la población para un mejor manejo de la pesca hacia la pesca sostenible (Aoki 2018).

Los principios básicos de los que depende la dinámica de una población de peces explotados fueron analizados por varios científicos (Russell, 1931, Buckland, 1948, Graham, 1948, Petersen, 1903, particularmente Baranov (1918) y los padres de la ciencia pesquera Beverton y Holt (1954). En la mayoría de los casos y en especial cuando se trata de poblaciones de peces que constituyen recursos pesqueros, es la población explotable la que interesa conocer, y la disponibilidad de esa parte de la población total para la pesquería y la investigación pesquera (Csirke, 1980).

La dinámica de poblaciones es el estudio de la vida del ente o unidad viviente que denominamos población. Es una rama de la biología que, con apoyo de otras ciencias, principalmente de las matemáticas, trata de describir y cuantificar los cambios que continuamente ocurren en la población.

Conocer la dinámica de una población de peces implica conocer el tamaño y la estructura de la población, además de la forma y la intensidad en que ésta cambia y se renueva (Csirke, 1980).

Toda población está constantemente bajo el efecto de factores inherentes y que al mismo tiempo tienden a hacerla aumentar y disminuir, y el tamaño y la estructura de la población dependen en todo momento del balance existente entre estos dos tipos de factores. Si tomamos cualquier población de peces y la seguimos a través del tiempo encontraremos que, a consecuencia de los factores descendentes, parte de sus integrantes irán muriendo por la pesca y otros irán muriendo por causas naturales, pero a consecuencia de los factores ascendentes los peces que sobrevivan seguirán alimentándose, seguirán creciendo y podrán reproducirse. A medida que esto ocurre, nuevos individuos o reclutas se van integrando a la población que está siendo explotada. Debido a esto es que los integrantes de cada población cambian con el tiempo, cambiando también la estructura y composición de la población. La población tenderá entonces a aumentar o a disminuir, o podrá mantenerse estable y en equilibrio, pero siempre será como resultado del balance existente entre los factores que ocasionan su activa y constante recuperación (Csirke, 1980).

Russell (1931) fue de los primeros en describir mediante un modelo matemático la dinámica de una población de peces en explotación, señalando al mismo tiempo los factores que rigen esta dinámica.

El modelo es básicamente descriptivo y ha servido de base para el desarrollo de modelos analíticos más complejos de amplia aplicación en la actualidad. Este modelo resume el concepto general de la dinámica de poblaciones de peces en una sencilla ecuación:

$$S_2 = S_1 - (C+M) + (G+R)$$

Donde:

- S_1 y S_2 = representan el peso o biomasa total* de la población existente al inicio y al final de un período de tiempo determinado.
- C = Representa la cantidad de peces muertos por la pesca en ese mismo período de tiempo.
- M = Representa la cantidad de peces muertos por causas naturales.
- G = Representa el crecimiento en peso experimentado por los miembros de la población que han sobrevivido a estas dos causas de mortalidad.
- R = Representa la cantidad de reclutas o de nuevos individuos que han ingresado a formar parte de la población en ese mismo tiempo.

De acuerdo a este modelo, la población se mantiene en equilibrio en tanto el incremento natural de la población ($G+R$) se mantenga igual al decremento ($C+M$) producido por la pesca y por las muertes naturales, de otra forma la población tenderá a aumentar o a disminuir según sean mayores los incrementos o los decrementos (Csirke, 1980). Pero la dinámica que los rige no es tan sencilla como se describe en la ecuación original de Russell, donde el crecimiento (G), el reclutamiento (R), la captura (C) y la muerte natural (M) aparecen como elementos únicos e independientes de una ecuación bastante simple. Estos factores están relacionados entre sí y además dependen de otros factores como el tamaño de la población misma (S_2), la edad o tamaño promedio de los individuos que la componen, las condiciones del ambiente, etc. (Csirke, 1980).

La población se compone de todos los individuos vivos en cualquier momento. Esta población se reduce continuamente en tamaño por las muertes, sea natural o por pesca, y se aumenta por el reclutamiento. Esto es lo que constituye a un “dynamic pool”.

El concepto estaba implícito en los primeros intentos de modelar su dinámica cuantitativamente, pero este fue desarrollado en el trabajo de Beverton y Holt (1957).

El crecimiento poblacional está determinado por una combinación de 4 procesos principalmente: (Hart y Reynolds 2008).



* Peso total de un grupo (o stock) de organismos vivos o de alguna fracción definida de ellos (por ejemplo, reproductores), en un área, en un momento particular

Bases científicas para la gestión

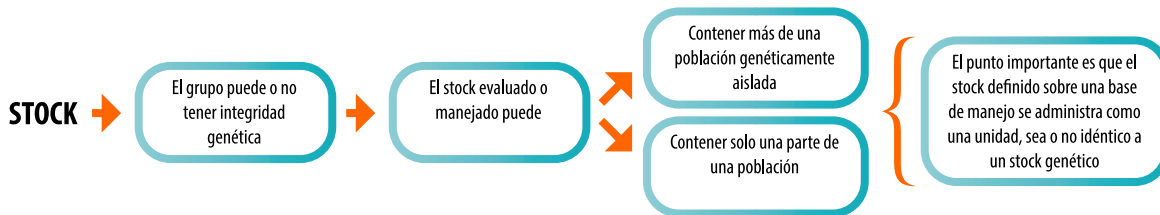
Los tomadores de decisiones de los recursos pesqueros son responsables de mantener estables a las poblaciones, y los científicos que evalúan las poblaciones son responsables de proporcionar análisis e índices de abundancia que puedan hacer posible el buen manejo (National Research Council, 1998).

Hay cinco pasos a considerar en una evaluación de stock: (los que se describirán a continuación)

Definición de stock

Una población de organismos se puede definir como todos los organismos que pertenecen a una especie determinada que viven en un área geográfica particular en un momento particular, es decir, todos los individuos capaces de reproducirse. Para fines de manejo práctico, un stock se define a partir de límites políticos*.

Para los administradores de las pesquerías, un stock es un grupo de peces de similar morfología y uso de hábitat, que se encuentran en una determinada localidad al mismo tiempo.



Elección de procedimientos de recopilación de datos

La elección del método depende de la estrategia de recopilación de datos, el tipo de variable que se vayan a medir, el origen, la precisión necesaria, y de los recursos disponibles. Los vínculos entre una variable, su origen y los métodos prácticos para su recopilación pueden ayudar a escoger métodos apropiados (FAO, 2001).

Los principales métodos de recopilación de datos son:

Métodos	Formas de recopilación de datos
El número de organismos capturados	El muestreo de desembarques y/o capturas (incluidos los descartes) proporciona información sobre el número de peces y longitud, edad, madurez y fecundidad.
El esfuerzo realizado para su captura	El rendimiento económico y la eficiencia de las pesquerías pueden estimarse a partir del esfuerzo y la captura por unidad de esfuerzo (CPUE); precio, costo y variables auxiliares; y bitácoras de registro o entrevistas.

* Es decir, la unidad de manejo, denominada stock, incluye a los miembros de un stock biológico que están bajo el manejo de un solo cuerpo gubernamental. Cuando el stock se extiende más allá de las jurisdicciones nacionales, solo la cooperación internacional puede permitir evaluaciones precisas y un manejo racional de los recursos compartidos (National Research Council, 1998).

Métodos	Formas de recopilación de datos
Los datos económicos	La captura y el rendimiento pueden determinarse a partir de los comprobantes de venta, encuestas y bitácoras de pesca.
La información biológica sobre los organismos capturados	<p>Para verificar la información obtenida de los pescadores, se pueden colocar observadores independientes en los buques pesqueros para registrar la captura, captura incidental, descartes y otras características biológicas.</p> <p>Los datos se pueden obtener de los pescadores comerciales y recreativos. Para verificar la información obtenida de los pescadores, se pueden colocar observadores independientes en los buques pesqueros para registrar la captura, captura incidental, descartes y otras características biológicas.</p> <p>Los métodos de muestreo incluyen el uso de redes de arrastre, palangre, trampas, técnicas de marcaje y técnicas aéreas. La investigación independiente de la pesca puede proporcionar otra información para ayudar a las evaluaciones de stock y mejorar los modelos.</p>

Elección de un modelo de evaluación. Evaluación de stock y sus parámetros

Cualquier modelo de evaluación de stock implica elecciones en dos niveles:

1. El modelo estructural
2. Los valores de los parámetros y los datos que se utilizarán.

El propósito de las evaluaciones de stock es proporcionar información a los tomadores de decisiones de las pesquerías, que les permita controlar la captura de las especies o el esfuerzo dirigido a ellas, para que, idealmente, las poblaciones puedan mantenerse en un RMS*.

Las evaluaciones de stock pueden realizarse analizando directamente las características de los datos y/o utilizando modelos para integrar los datos. Se pueden modelar diferentes procesos que afectan los cambios en la abundancia del stock, incluidos el reclutamiento, la mortalidad natural y pesquera, la selectividad de los artes pesca, las relaciones de captura-reclutamiento del stock y las tasas de movimiento (National Research Council, 1998).

En general, las evaluaciones de stock estiman la abundancia actual de un stock, su tasa de extracción debido a la pesca y/o la abundancia necesaria para mantener el stock en el futuro.

Revisión de los modelos existentes

Los métodos de evaluación generalmente se basan en dos tipos de modelos matemáticos:

1. Un modelo de dinámica poblacional.
2. Un modelo de la relación de las observaciones con los atributos reales de toda la población.

Estos modelos se colocan en un marco estadístico para la estimación de la abundancia y los parámetros asociados e incluyen supuestos sobre los tipos de errores que ocurren en cada modelo y un supuesto sobre la función objetivo** utilizada para elegir entre valores de parámetros alternativos.

* Rendimiento Máximo Sostenible (MSY por sus siglas en inglés) es la mayor captura promedio que se puede capturar de una población en condiciones ambientales existentes de manera sostenible.

** Las funciones objetivas miden la "bondad de ajuste" entre el modelo de población y las observaciones.

Los tipos generales de modelos poblacionales incluyen modelos:

- De producción excedente.
- De diferencia de retraso (Delay Difference Model).
- Basados en edad y talla.

Estos se basan en tasas de cambio de la biomasa y productividad, que pueden calcularse en función de la información sobre el rendimiento de la pesca, el reclutamiento y las muertes naturales (Tabla 1).

Análisis generales	Consideraciones
<p>Datos de captura por edad:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Análisis de cohorte (Pope, 1972) y el Análisis de Población Virtual (Gulland, 1965). • ADAPT-VPA (Gavaris, 1988), XSA (Pastor, 1999), y métodos ajustados (Laurec y Shepherd, 1983). 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizan una serie temporal de datos de edad de captura para seguir la captura tomada de una cohorte a medida que envejece con el tiempo. Los números iniciales en una cohorte se pueden calcular como la suma de la captura de la cohorte junto con una estimación de La tasa de mortalidad natural. Hay varias limitaciones a estos métodos, y es bien sabido que no son confiables a menos que se utilice información auxiliar (Pope y Stokes, 1989; Rivard, 1989). • Son las formas más comunes de incluir información auxiliar en un análisis de captura por edad. La salida (reclutamiento y biomasa) a menudo se utiliza como base para el análisis de reclutamiento de poblaciones.
<p>Datos de captura y esfuerzo: Modelos de producción excedente (Schaefer, 1954; Pella y Tomlinson, 1969).</p>	<p>Utilizan una serie temporal de datos de captura y esfuerzo para reconstruir la trayectoria de biomasa de la población. Estos métodos tradicionalmente no modelan la estructura de edad, pero modelan los cambios en la biomasa como una función simple de biomasa en el año anterior.</p>
<p>Tamaño de stock y datos de reclutamiento: Análisis de stock-reclutamiento (Ricker, 1954; Beverton y Holt, 1957).</p>	<p>Intentan estimar la relación entre el stock y reclutamiento, y requiere estimaciones tanto del tamaño del stock como de la cantidad de reclutamiento para una serie de años.</p>
<p>Análisis de rendimiento por recluta (Beverton y Holt, 1957).</p>	<p>Utiliza información sobre mortalidad natural, tasas de crecimiento y selectividad específica de edad de la pesquería para determinar tasas óptimas de captura y edad óptima al ingresar a la pesquería basada en un modelo dinámico de población de estructura de edad. Este análisis ignora cualquier relación entre el stock y reclutamiento y las tasas de captura resultantes a menudo se comparan con las estimaciones de la tasa de captura de, por ejemplo, análisis de población virtual. No se pueden obtener estimaciones absolutas de la biomasa a partir de este análisis.</p>
<p>Datos de marcaje:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Número de liberados y recapturados- Análisis de marcaje de Petersen (Petersen, 1896). • Longitud en la liberación, longitud en la recaptura y tiempo en libertad: el análisis de crecimiento de marcado (Fabens, 1965). 	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliza el número de marcas liberadas, el número de individuos muestreados y el número de recuperaciones para estimar el tamaño de la población. • Utiliza los incrementos de crecimiento calculados a partir de los datos de marcaje para estimar las tasas de crecimiento. Las estimaciones de crecimiento a menudo se usan como insumos en el análisis de rendimiento por recluta.

Los modelos de cambio poblacional pueden escribirse como una ecuación diferencial:

$$B = dB/dt = P - Y = R + G - D - Y$$

Dicha como, la tasa de cambio en la biomasa (B) es igual a la productividad (P) menos el rendimiento (Y). La productividad de una población depende del reclutamiento de la progenie (R), del crecimiento

(G) y la muerte (D) de los individuos existentes.

Salvo los procesos dependientes del tiempo en la ecuación, la biomasa de equilibrio y el rendimiento resultan solo si algunas de las tasas están reguladas por las densidades de población; de lo contrario, la población puede aumentar o disminuir sin límite (National Research Council, 1998).

Tipos de modelos

Modelos de producción excedente

Utilizan ecuaciones de recursión para determinar la abundancia de clases anuales en función de varios parámetros.

Este tipo de modelos se pueden implementar con una respuesta instantánea (sin retrasos) o una aproximación de ecuación de diferencia de 1 año. Estos modelos tienen parámetros de productividad simples integrados y no requieren datos de edad o talla (Schaefer, 1954; Fletcher, 1978; Prager, 1994). La estimación se logra ajustando predicciones de modelos no lineales de biomasa explotable a algunos índices de abundancia de población explotable (generalmente CPUE) (National Research Council, 1998).

Sus principales ventajas son: los parámetros del modelo pueden estimarse con estadísticas simples sobre la abundancia agregada y los modelos proporcionan una respuesta simple entre los cambios en la abundancia y los cambios en la productividad. Las principales desventajas son que carecen de realismo biológico (es decir, requieren que la pesca tenga un efecto en la población dentro de 1 año), y no pueden hacer uso de la información específica de edad o tamaño disponible de muchas pesquerías. Sin embargo, en algunas circunstancias, los modelos de producción excedente pueden proporcionar mejores respuestas que los modelos estructurados por edad (National Research Council, 1998).

Modelos de diferencia de retraso (Delay difference Model)

Estos modelos incorporan la estructura de edad y proporcionan un método para ajustar un modelo poblacional estructurado por edad o tamaño a los datos agregados por edad (Deriso, 1980; Schnute, 1985; Horbowy, 1992). La estimación se puede lograr ajustando predicciones de modelos no lineales de cantidades agregadas a CPUE, índices de biomasa y/o índices de reclutamiento. Estos modelos son una solución de caso especial para un modelo de matriz agregada bajo el supuesto de un modelo de crecimiento específico de edad (ecuación de von Bertalanffy).

Estos tipos de modelos comparten las ventajas de los modelos de producción excedente, además, la relación funcional entre la productividad y la abundancia explica tanto los efectos de rendimiento por recluta y de reclutas-desovadores. A diferencia de los modelos de producción, los parámetros de estos modelos tienen interpretaciones biológicas directas, pero no pueden hacer uso completo de la información específica por edad o tamaño. Además, estos modelos requieren la estimación de más condiciones iniciales que los modelos de producción (National Research Council, 1998).

Modelos basados en la edad

Utilizan ecuaciones de recursión para determinar la abundancia de clases anuales en función de varios parámetros. No se requieren relaciones entre la biomasa del stock desovante y el reclutamiento, pero se pueden utilizar. Debido a la naturaleza flexible de tales modelos, la integración de aspectos del proceso de recopilación de datos con el modelo de población es factible. La estimación se puede lograr mediante procedimientos de máxima probabilidad o mínimos cuadrados aplicados a índices

de abundancia específicos por edad, captura específica por edad y otros tipos de información auxiliar.

La principal ventaja de estos modelos es que hacen uso casi completo de la información disponible específica para la edad. La desventaja principal es que tales modelos requieren muchas observaciones e incluyen muchos parámetros, lo que aumenta el costo de su uso (National Research Council, 1998).

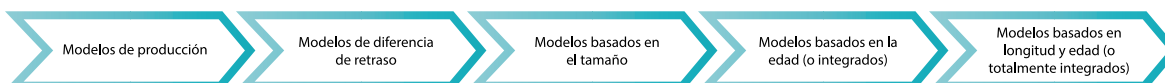
Modelos basados en la longitud y edad o totalmente integrados

Los modelos que integran datos de talla y edad son más complicados que los modelos basados en la edad porque el crecimiento debe especificarse para relacionar la talla con la edad.

Este tipo de modelos se pueden implementar con una respuesta instantánea (sin retrasos) o una aproximación de ecuación de diferencia de 1 año. Estos modelos tienen parámetros de productividad simples integrados y no requieren datos de edad o talla (Schaefer, 1954; Fletcher, 1978; Prager, 1994). La estimación se logra ajustando predicciones de modelos no lineales de biomasa explotable a algunos índices de abundancia de población explotable (generalmente CPUE) (National Research Council, 1998).

Sus principales ventajas son: los parámetros del modelo pueden estimarse con estadísticas simples sobre la abundancia agregada y los modelos proporcionan una respuesta simple entre los cambios en la abundancia y los cambios en la productividad. Las principales desventajas son que carecen de realismo biológico (es decir, requieren que la pesca tenga un efecto en la población dentro de 1 año), y no pueden hacer uso de la información específica de edad o tamaño disponible de muchas pesquerías. Sin embargo, en algunas circunstancias, los modelos de producción excedente pueden proporcionar mejores respuestas que los modelos estructurados por edad (National Research Council, 1998).

En términos de demandas de datos y número de parámetros, estos métodos se clasifican de menor a mayor intensidad:



A medida que los modelos se vuelven más complejos:

- Disminuye la posibilidad de identificar errores en el modelo
- Incrementa la posibilidad de identificar erróneamente algún componente
- Aumenta el realismo biológico
- Aumenta el costo de la recolección de datos

La elección de los modelos generalmente se basa en la experiencia pasada. Los modelos que suponen que el stock está en equilibrio actualmente se evitan porque la experiencia ha indicado que este supuesto rara vez es cierto. Cualquier modelo utilizado en una evaluación incluye muchos parámetros que se asignan en función de datos distintos de los utilizados en la evaluación.

Los siguientes son algunos ejemplos de tales parámetros:

- La tasa de mortalidad natural generalmente se le asigna un valor fijo basado en una relación con la edad máxima de la especie, la tasa de crecimiento, el tamaño máximo u otra información demográfica o de historia de vida (Vetter, 1988).
- La relación entre los índices de abundancia y la verdadera abundancia es generalmente asumida que será de forma lineal, y la pendiente generalmente se estima como parte de la evaluación del stock.
- La variabilidad de reclutamiento generalmente se deja sin restricciones, pero puede estar limitada a algún valor estimado a partir de otros datos o basado en la experiencia.
- Se puede elegir una forma funcional específica para la relación entre el stock y el reclutamiento y estimar sus parámetros junto con la abundancia.
- La compensación* generalmente se supone que no ocurre. Muchos métodos de evaluación no requieren especificación de estos parámetros.

Por lo general, los parámetros se estiman ajustando los modelos a la información pesquera recopilada de pesquerías comerciales y muestreos científicos (Hilborn y Walters, 1992). La calidad de la estimación de parámetros y, por lo tanto, la de la evaluación de stock puede verse afectada por muchos factores, como la cantidad de información pesquera disponible para la estimación de parámetros y la evaluación de stock.

Han surgido nuevos enfoques de evaluación, ya que el manejo de la pesca implica la toma de decisiones en presencia de incertidumbre. Las evaluaciones del stock pesquero deberían proporcionar el apoyo cuantitativo necesario para que los tomadores de decisiones consideren las regulaciones en el contexto de la incertidumbre. Un medio apropiado para proporcionar apoyo cuantitativo en presencia de incertidumbre es mediante el uso del análisis estadístico bayesiano (ver Gelman et al. 1995; Punt y Hilborn, 1997).

En un modelo bayesiano, los parámetros desconocidos para un sistema se reemplazan por distribuciones conocidas para los parámetros observados anteriormente, generalmente llamados “priors”. Si hay más de un parámetro, se debe describir cada distribución individual, así como las distribuciones de probabilidad conjunta (National Research Council, 1998).

El meta análisis se define como un método cuantitativo para combinar información a través de estudios relacionados, pero independientes. Su objetivo es integrar la información de varios estudios y resumirla. Tal como se efectúan las evaluaciones de stock, el meta análisis implica la compilación de datos preexistentes para determinar los valores de los parámetros de los modelos o para desarrollar distribuciones de probabilidad previas para estos parámetros. Pauly (1980) describió el método de meta análisis más utilizado para la pesca y examinó la relación entre la tasa de mortalidad natural, la temperatura del agua y los parámetros de crecimiento para un gran número de poblaciones de peces.

Hay dos desarrollos recientes en el meta análisis para evaluaciones de stock:

1. La compilación de grandes conjuntos de datos.
2. La aplicación de métodos formales bayesianos para estimar distribuciones de probabilidad previas.

* La compensación es una reducción en la productividad per cápita en tamaños de stock bajos

Los modelos de pesca contemporáneos se rigen por tres principios generales:

1. Los modelos deben ser lo más simples posible.
2. La complejidad de un modelo debe coincidir con el objetivo y los datos disponibles.
3. Los modelos deben juzgarse por su utilidad más que por la belleza de las matemáticas, porque son herramientas, no objetivos por sí mismos.

Los modelos matemáticos se utilizan para explicar un sistema complicado en uno más simple que podamos entender fácilmente y usar para las predicciones. Nuestra capacidad de modelar el mundo real depende de nuestra capacidad de recopilar datos adecuados. Los modelos inteligentes no pueden sustituir los datos incorrectos, y los modelos no necesariamente mejoran nuestra comprensión de un sistema pesquero (Hart y Reynolds 2008).

La comprensión de los impactos de la cantidad de datos en la evaluación del stock es vital para mejorar la evaluación misma y desarrollar estrategias de manejo preventivo. La información insuficiente sobre la diversidad de datos o el número y calidad de información puede conducir a una gran incertidumbre o incluso un sesgo en la estimación de los parámetros y, en última instancia, a una mala gestión y sobreexplotación de los recursos (Aoki et al. 2018; Chen, Chen, y Stergiou 2003).

Muchos modelos pesqueros están disponibles para la evaluación de un stock. Estos modelos difieren mucho en su estructura matemática, supuestos, requisitos de datos, implicaciones biológicas y ecológicas, y en sus resultados. La elección de un modelo para una pesquería dada a menudo se decide por la cantidad de información disponible para la evaluación del stock.

Por lo tanto, una pesquería económica y/o socialmente importante, que probablemente tenga una gran cantidad de datos recolectados para una gran cantidad de variables pesqueras de diferentes fuentes, a menudo se evalúa utilizando modelos de evaluación de stock con un alto nivel de complejidad. Sin embargo, para una pesquería menos valiosa, la cantidad de información es probable que sea limitada, y los modelos simples con más suposiciones pueden tener que usarse en la evaluación del stock. La cantidad de datos pesqueros es, por lo tanto, crítica para determinar el tipo de modelos pesqueros para la evaluación de poblaciones (Chen et al., 2003).

Evaluación de acciones alternativas y especificación de indicadores de desempeño

Una vez que se han recopilado los datos y se ha estimado el tamaño y estructura de la población del stock, se deben desarrollar estrategias de captura y manejo. El reto en el manejo de las pesquerías se complica por el hecho de que muchas poblaciones se superponen a los límites jurisdiccionales.

Para las poblaciones que son compartidas y cuentan con una combinación de usuarios, a veces hay actividades de manejo en conjunto y existe intercambio de datos para lograr el manejo de las poblaciones como unidades completas.

- Las herramientas utilizadas por los administradores varían de una pesquería a otra, que van desde la ausencia de control hasta la especificación de la captura total permitida.
- Las herramientas de manejo también pueden incluir las épocas del año en que se puede pescar; el equipo que puede usarse con límites de tamaño mínimo; y, en algunos casos, la cantidad de pescado que un pescador, comunidad, compañía u otra entidad puede capturar.

Presentación de resultados

Los resultados de las evaluaciones se deben presentar a las instituciones de manejo pesquero o a los encargados de regular a las pesquerías. El formato de presentación dependerá de los cuerpos gubernamentales de cada país. Los documentos de evaluación de stock generalmente contienen información sobre la pesquería, su captura, CPUE, estimaciones de la biomasa y estimaciones de otros parámetros importantes de la población.

Lo anterior será utilizado como recomendaciones de los niveles de captura aceptables. Aunque todavía no es común, la evaluación de riesgos y el tratamiento explícito de la incertidumbre se están convirtiendo en un componente importante de los informes (National Research Council, 1998).

Con base a Cadima (2003), para la evaluación de stock pesqueros es necesario: bases de datos apropiadas, analizar los datos disponibles, proyecciones de rendimiento y biomasa a corto y largo plazo, determinar puntos de referencia biológicos a largo plazo, estimar los efectos a corto y largo plazo sobre el rendimiento y la biomasa de diferentes estrategias de explotación pesquera (Fig. 3).

Los diferentes pasos para evaluar un stock son:

- a. Definir los objetivos de la evaluación de acuerdo con la fase de desarrollo de las pesquerías y la información disponible.
- b. Para la recopilación de información:
 - o Estadísticas comerciales de la pesca.
 - o Desembarques totales y por recursos, captura, esfuerzo de pesca (número de viajes, días, tiempo dedicado a la pesca, etc.) y características de los artes utilizados.
 - o Muestreo biológico en los puertos de desembarque y a bordo de embarcaciones de investigación.
- c. Analizar los stocks.



Figura 3. Esquema general en la toma de datos y decisiones de la actividad pesquera. modificado de Cadima (2003).

Puntos de referencia biológicos para el manejo y conservación de los recursos pesqueros

Los objetivos a largo plazo para la ordenación pesquera deberían tener en cuenta la investigación científica pesquera, la dinámica de la población y los cambios climáticos que pueden afectar a las poblaciones.

Para definir estos objetivos a largo plazo, tenemos que considerar los valores del nivel de pesca, que permitan mayores capturas en peso, y al mismo tiempo que aseguren la conservación de las poblaciones. También debe tenerse en cuenta los valores extremos de biomasa o niveles de pesca que podrían afectar la recuperación de las poblaciones. Estos valores de nivel de pesca, de captura y biomasa se designan como Puntos de Referencia Biológicos (PRB)* (Cadima, 2003).

Los modelos de estimación de los PRB, en términos de la tasa de mortalidad por pesca, pueden ser clasificados en tres categorías:

- Aquellos basados en los modelos de producción.
- Basados en el rendimiento por recluta.
- Basados en la biomasa desovante por recluta

(Collie y Gislason 2001).

Independiente de la forma en que un PRB sea expresado, se pueden diferenciar según la información que proveen para la toma de decisiones (Yáñez, 2016).

De esta manera, se distinguen Puntos de Referencia Límites (PRL), o Puntos de Referencia Objetivos (PRO)**.

La evaluación de los PRB debe actualizarse, teniendo en cuenta los posibles cambios en los parámetros biológicos y en el patrón de explotación. Este hecho es importante porque los nuevos puntos de referencia biológicos serán diferentes de los anteriores (Cadima, 2003). La mayoría de los marcos internacionales de ordenación pesquera y actualmente vigentes, se sustentan en el concepto del Rendimiento Máximo Sostenible (RMS). Sin embargo, aunque el concepto es relativamente sencillo y fácil de entender, su implementación no lo es tanto, debido a la naturaleza dinámica del RMS, así como también, de los puntos de referencia asociados con éste. Los marcos de ordenación pesquera actualmente se orientan a una aproximación en torno al RMS, que al logro de éste. La principal variable utilizada para realizar los ajustes, son cambios en los niveles de mortalidad por pesca, lo que está condicionado a su vez a las prácticas de pesca, así como también, a factores ambientales y ecológicos (Salas-Guzmán, Valderrama-Barco, Barreto-Reyes, & Atencio-García, 2018).

* Los PRB permiten definir el estado deseable de explotación y el estado en que se pone en riesgo la sostenibilidad biológica de un recurso dado (Collie y Gislason 2001). Siendo definidos como el nivel de mortalidad por pesca (F) o de biomasa (B), que permiten una explotación

** Siendo definidos como el nivel de mortalidad por pesca (F) o de biomasa (B), que permiten una explotación sostenible a largo plazo de las poblaciones, con la mejor captura posible (Cadima, 2003). Los PRB son determinados utilizando datos de abundancia a través del tiempo y los parámetros de historia de vida de los stocks de peces. En el caso de no contar con datos suficiente, los PRB pueden ser estimados basándose en los parámetros de un stock de similares características (Collie y Gislason 2001; Yáñez 2016).

Conclusión

La ciencia pesquera está cambiando rápidamente. Los análisis bio-económicos son cada vez más importantes en la evaluación y gestión de las pesquerías y hay más preocupación que nunca sobre los impactos de la pesca en el medio marino. El requisito de proporcionar asesoramiento basado en la ciencia para poblaciones explotadas en situaciones de escasez de datos ha obligado a los administradores y modeladores a ser creativos en cómo utilizar las fuentes de datos de manera eficiente. También ha llevado a la representación explícita y la estimación de la incertidumbre, para que pueda ser considerada en la toma de decisiones del manejo pesquero.

La sostenibilidad de la pesca ha sido difícil de lograr, con un mayor número de pesquerías en el mundo y el registro de la disminución de las capturas, las poblaciones están siendo totalmente explotadas, sobreexplotadas o agotadas, sin signos inmediatos o evidentes de recuperación. Entre las razones que explican este hecho están las características inherentes, las variables complejas de los recursos, el comportamiento de los pescadores y las fuerzas del mercado. La mayoría de los sistemas pesqueros aún no se conocen bien con respecto a los vínculos entre la estructura de la población, su dinámica y las características bio-económicas del proceso de pesca.

Los modelos pesqueros actuales son más sofisticados que sus versiones originales. A pesar de esto, los modelos de evaluación han fallado, y en algunos casos el uso de datos de captura y esfuerzo ha subestimado la gravedad de la disminución. Los modelos por sí solos han sido señalados como ineficientes como herramientas para el manejo pesquero. El colapso de varias poblaciones importantes demostró que los métodos de evaluación cuantitativos de las poblaciones no garantizaban que una pesquería fuera sostenible. Los modelos actúan como metáforas de la realidad. Cualquier conjunto de conceptos que describan cómo responden estas poblaciones a la pesca y otros eventos puede considerarse un modelo. Los pescadores, los administradores, los biólogos y el público en general utilizan modelos, al menos implícitamente, cuando discuten el destino de las poblaciones de peces.

Las matemáticas desempeñan un rol útil al identificar con precisión las diferencias entre los escenarios propuestos. Sin embargo, los escenarios pueden contradecirse, y la ciencia debe ir más allá de las matemáticas para una resolución. La capacidad de predecir el colapso del stock depende de una perspectiva más amplia que un modelo matemático único. Desde una perspectiva histórica, los modelos matemáticos de pesca tienen una evolución natural que comienza con el intento de dar sentido a los datos biológicos y de captura recopilados de las pesquerías. Recopilar información de las partes interesadas durante el desarrollo del modelo enriquece los resultados del modelo y crea una atmósfera para la aceptación del modelo. Los resultados con fuertes vínculos interactivos con los datos son más fáciles de seguir y más creíbles para los tomadores de decisiones, los pescadores y el público en general. Así, el uso adecuado de los modelos pesqueros proviene de un reconocimiento franco de sus limitaciones.

Referencias

- Aoki, I., Yamakawa, T., & Takasuka, A. (2018). *Fish Population Dynamics, Monitoring, and*. (I. Aoki, T. Yamakawa, & A. Takasuka, Eds.). Springer Fisheries Science Series.
- Cadima. (2003). *Fish Stock Assessment. A Manual of Basic Methods* (Vol. 53). FAO Fisheries Technical Paper 393.
<https://doi.org/10.2307/4553>
- Castilla, J. C., & Defeo, O. (2001). Latin American benthic shellfisheries: Emphasis on co-management and experimental practices. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 11(1), 1–30.
<https://doi.org/10.1023/A:1014235924952>
- Chen, Y., Chen, L., & Stergiou, K. I. (2003). Impacts of data quantity on fisheries stock assessment. *Aquatic Sciences*, 65(1), 92–98.
<https://doi.org/10.1007/s000270300008>
- Collie, J. S., & Gislason, H. (2001). Biological reference points for fish stocks in a multispecies context. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 58(11), 2167–2176.
<https://doi.org/10.1139/f01-158>
- Council, N. R. (1998). *Improving Fish Stock Assessments*. Washington, DC: The National Academies Press.
<https://doi.org/10.17226/5951>
- Csirke, J. (1980). *Introducción a la dinámica poblacional de peces*. FAO Documento Técnico de Pesca 192.
- FAO. (2001). *Directrices para la Recopilación Sistemática de Datos Relativos a la Pesca de Captura*. Roma: FAO Documento Técnico de Pesca 382.
- Hart, P. J. B., & Reynolds, J. D. (2008). *Handbook of Fish Biology and Fisheries*. (P. J. B. Hart & J. D. Reynolds, Eds.) (Vol. 2). Blackwell Publishing.
<https://doi.org/10.1002/9780470693919>
- Hilborn, R., & Walters, C. J. (1992). *Quantitative Fisheries Stock Assessment: Choice, Dynamics and Uncertainty*. Routledge, Chapman & Hall, Inc. Retrieved from
<https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-1-4615-3598-0>
- Jennings, S., Kaiser, M. J., & Reynolds, J. D. (2001). *Marine Fisheries Ecology*. (S. Jennings, M. J. Kaiser, & J. D. Reynolds, Eds.). Blackwell Publishing.
<https://doi.org/10.1080/15627020.2001.11657143>
- Maunder, M. N., & Punt, A. E. (2013). A review of integrated analysis in fisheries stock assessment. *Fisheries Research*, 142, 61–74. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2012.07.025>
- McClanahan, T. R., & Castilla, J. C. (2007). *Fisheries management: Progress towards sustainability*. (T. McClanahan & J. C. Castilla, Eds.). Blackwell Publishing.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Royce, W. F. (1996). *Introduction to the practice of fishery science*. (W. F. Royce, Ed.). Academic Press, Inc.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>



- Salas-Guzmán, F., Valderrama-Barco, M., Barreto-Reyes, C., & Atencio-García, V. (2018). Puntos de referencias biológicos para la ordenación pesquera de *Ageneiosus pardalis* (Auchenipteridae) en el embalse Urrá. *Acta Biologica Colombiana*, 23(2), 163–169. <https://doi.org/10.15446/abc.v23n2.64195>
- Schnute, J. T., & Richards, L. J. (2001). Use and abuse of fishery models. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 58, 10–17. <https://doi.org/10.1139/f00-150>
- Yáñez, A. A. (2016). Puntos Biológicos de Referencia para la Pesquería de Merluza del Sur *Merluccius australis* con Interacción entre Flotas. Universidad de Concepción.

Imágenes cortesía de:

Alicia MedinaBerta Maldonado, Ítalo Bonilla, Pablo Rico y Tom Müller.