



**UADY**  
UNIVERSIDAD  
AUTÓNOMA  
DE YUCATÁN

# Revista de Economía,

Facultad de Economía, Universidad Autónoma de Yucatán

## Modelo bioeconómico y simulador de escenarios para el aprovechamiento sostenible de pesquerías en México

Bioeconomic model and scenario simulator for the sustainable utilization of fisheries in Mexico

Miriam Del Valle Morales<sup>1</sup>

### Resumen

Se presenta un modelo bioeconómico con optimización dinámica para maximizar las ganancias generadas por el aprovechamiento de especies marinas. Como condición esencial, se establece y demuestra en este artículo una relación de orden de crecimiento entre el precio y el costo necesaria para la aplicabilidad del modelo. Además, se introduce el diseño original de un simulador computacional (una aplicación de Matlab®) que permite planificar vedas y esfuerzos pesqueros para obtener ganancias máximas corto, mediano y largo plazo. El simulador proporciona los valores correspondientes en cualquier período, con tasas de descuento ajustables según las condiciones del usuario. Entre sus funcionalidades, el simulador determina el mínimo esfuerzo con el que debe contar una pesquería, así como el valor mínimo que se debe fijar para la biomasa residual como estándar de preservación de la especie. De este modo, cualquier pesquería puede analizar, si dispone de las unidades de esfuerzo necesarias para implementar el modelo, y evaluar su viabilidad económica durante períodos de veda inicial. Por ejemplo, podría decidir si es más conveniente esperar hasta el inicio de la captura o invertir en otro proyecto temporalmente. En síntesis, el simulador permite a las pesquerías evaluar distintos escenarios y tomar decisiones óptimas sobre la aplicación (o no) del modelo según sus intereses. Con el fin de mostrar su funcionamiento, se empleó la aplicación con datos reales de dos especies mexicanas.

**Palabras clave:** modelo bioeconómico, optimización dinámica, simulación de escenarios, sobrepesca, sostenibilidad.

**JEL Classification:** C61, Q22, Q57.

1- Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Estado de México, México, Correo electrónico: [miriamdelvalle@tec.mx](mailto:miriamdelvalle@tec.mx)  ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6330-9084>



## Abstract

A bioeconomic model with dynamic optimization is presented to maximize the profits generated from the exploitation of marine species. As an essential condition, this article establishes and demonstrates a growth order relationship between price and cost, which is necessary for the model's applicability. Additionally, it introduces the original design of a computational simulator (a Matlab® application) that allows for the planning of fishing bans and fishing efforts to achieve maximum profits in the long, medium, or short term. The simulator provides the corresponding values for any period, with discount rates adjustable according to user-defined conditions. Among its features, the simulator determines the minimum effort a fishery must have, as well as the minimum value that should be set for the residual biomass as a standard for species preservation. In this way, any fishery can assess whether it has the necessary effort units to implement the model or even analyze its economic viability during initial ban periods. For example, it could decide whether it is more convenient to wait until the start of harvesting or to temporarily invest in another project. In summary, the simulator enables fisheries to evaluate different scenarios and make optimal decisions regarding the application (or not) of the model according to their interests. To demonstrate its functionality, the application was used with real data from two Mexican species.

**Keywords:** bioeconomic model, dynamic optimization, fishery sustainability, overfishing, scenario simulation.

**JEL Classification:** C61, Q22, Q57.

## 1. Introducción

La pesca es una de las actividades más antiguas para el sustento humano, que en un principio se concebía como una fuente más de alimentación, pero en cuanto la producción empezó a incrementarse se gestó todo un negocio de comercialización en torno a esta actividad. El aumento sostenido de la demanda global de pescado ha impulsado un incremento en el volumen de capturas, con consecuencias directas en la drástica disminución de las poblaciones (Pauly *et al.*, 2002).

Potencialmente el fenómeno de la sobrepesca comenzó a nivel mundial en la década de 1970 (Jackson *et al.*, 2001), cuando el desarrollo de la tecnología permitió aumentar las capturas y explorar fácilmente los océanos. Así, del 90% de la población mundial de peces que se tenían en un nivel biológicamente sostenible en 1974, en el 2017 se llegó al 65%. Es decir que la sobrepesca se ha casi triplicado en las últimas cuatro décadas (FAO, 2022).

En el caso de México, el sector pesquero tiene gran relevancia en términos económicos. Alrededor de 300 mil personas se dedican a la actividad pesquera y acuícola, aportando un 0.7%

al PIB agropecuario. México es uno de los principales productores de pescados y mariscos en América Latina al producir aproximadamente dos millones de toneladas anuales (CONAPESCA, 2025). Sin embargo, la sobrepesca continúa siendo un desafío importante.

De acuerdo con el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR, 2024), de 82 pesquerías marinas reconocidas en México, el 34.1% se encuentran sobreexplotadas, el 53.7% están en su máximo rendimiento sostenible y solo 6.1% presentan potencial de desarrollo.

Para mitigar la sobrepesca se han implementado medidas como cuotas de captura y periodos de veda. Si bien estas acciones buscan proteger las poblaciones marinas, también han generado afectaciones económicas para el sector pesquero (Hilborn *et al.*, 2020), sin haber logrado resultados eficaces todavía. Por lo anterior, es necesario proponer modelos bioeconómicos, como en el presente artículo, que coadyuven a resolver esta problemática. Los simuladores permiten evaluar escenarios que consideran tanto la sostenibilidad del recurso como la viabilidad económica (Failler, Pan y Akbari, 2022). Al incorporar variables como la tasa de descuento, el esfuerzo mínimo requerido y la biomasa residual, estas herramientas permiten a las pesquerías planificar mejor su actividad y anticipar los efectos de distintas decisiones.

En este contexto, el presente trabajo se divide de la siguiente manera: en el apartado dos se presentan los fundamentos teóricos; en el tres, las variables y los supuestos del modelo. El apartado cuatro desarrolla el planteamiento formal del modelo y su solución. En el quinto apartado se expone el algoritmo que permite planear esfuerzos y vedas, así como su implementación mediante una aplicación programada en Matlab®. El sexto apartado está dedicado a los casos de estudio, en los que se aplica el simulador a las pesquerías del pepino de mar en Baja California y del mero rojo en Yucatán. Finalmente, el apartado siete contiene las conclusiones del estudio.

## 2. Fundamentos teóricos

En el siglo XIX se creía que solo los recursos no renovables podían agotarse a largo plazo, y que la actividad pesquera tenía un impacto mínimo en los océanos debido a la vasta riqueza de sus recursos. Sin embargo, fue la economía la que introdujo la noción de renta en la explotación de recursos renovables, sentando así las bases de la bioeconomía pesquera (Surís y Varela, 1995).

A mediados del siglo XX, modelos como los de Gordon (1953, 1954) y Schaefer (1957) comenzaron a integrar aspectos biológicos y económicos, aunque desde enfoques estáticos. La dinámica reproductiva de las especies exigió posteriormente el desarrollo de modelos dinámicos, que incorporaron herramientas como la teoría de control óptimo (Clark, 1985). Estos modelos buscan equilibrar la rentabilidad económica con la sostenibilidad ecológica, maximizando el excedente entre ingresos y costos (Seijo y Salas, 1997)

El modelo de Schaefer (1954) establece que las capturas dependen del esfuerzo pesquero (embarcaciones, redes, números de viajes, etc.), inicialmente aumentan con el esfuerzo, pero al rebasar un determinado límite, la biomasa se reduce, afectando la reproducción. Clark (1985)

aplicó este enfoque a la ballena azul, formulando un problema de control óptimo para maximizar el valor presente de la ganancia, sujeto a restricciones biológicas de crecimiento y esfuerzo máximo. Su “regla de oro”<sup>1</sup> vincula tasas de crecimiento, costos y tasas de descuento, aunque omite condiciones de transversalidad y validación empírica, limitaciones también presentes en Anderson y Seijo (2010).

Con el avance de los métodos computacionales, los modelos bioeconómicos han ido incorporando elementos que permiten simular el comportamiento del recurso bajo distintos escenarios. En lugar de limitarse a encontrar soluciones analíticas, ahora es posible representar trayectorias con diferentes combinaciones de esfuerzo, precios, costos, tasas de crecimiento o condiciones ambientales. Estos desarrollos han ampliado la utilidad de la bioeconomía pesquera, al facilitar la exploración de distintas alternativas de manejo y observar sus consecuencias en el tiempo (Kvamsdal *et al.*, 2020). A partir de ello, se han propuesto enfoques más complejos que combinan la pesca con otras actividades económicas, como el turismo, y que buscan encontrar condiciones que permitan obtener beneficios sin comprometer la continuidad del recurso (Sarkar, Bhattacharya y Bairagi, 2023). En todos los casos, se reconoce la necesidad de adaptar los modelos a contextos específicos y considerar las limitaciones de información o recursos que enfrentan las unidades productivas (Fenichel y Abbott, 2014).

Aunque a nivel internacional existen varias propuestas que utilizan simuladores como apoyo para el manejo de pesquerías, en México son pocos los estudios que vinculan el análisis económico con herramientas de simulación accesibles. La mayoría de los trabajos se centran en aspectos biológicos o legales, y es poco frecuente que se desarrollen modelos que puedan ser utilizados directamente por quienes toman decisiones sobre el uso del recurso (Defeo, 2015). Esta ausencia limita la posibilidad de organizar la captura de manera anticipada o de estimar los efectos de aplicar diferentes niveles de esfuerzo o establecer períodos de veda (Arnason, 2009).

En este sentido, el modelo que se presenta en este trabajo retoma los elementos esenciales del enfoque bioeconómico y propone una herramienta que permite representar distintos escenarios posibles, con el objetivo de facilitar la planeación del aprovechamiento en condiciones donde la información disponible es limitada.

La investigación aplicada a la actividad pesquera, de manera automática se relaciona primeramente con aspectos biológicos, pero cabe señalar que la investigación en este campo analiza a la pesca en su conjunto (Charles, 2001), donde además de considerar las características biológicas de estos recursos, también estudia las actividades económicas asociadas a las técnicas de captura, procesamiento y rentabilidad de las pesquerías. Eso incluye analizar variables como precios de playa y costos por unidad de esfuerzo.

---

<sup>1</sup> La “regla de oro” formulada por Colin W. Clark en su obra *Bioeconomic Modelling and Fisheries Management* (1985), se refiere precisamente al nivel de biomasa que maximiza el valor presente neto (VPN) de la pesquería bajo una tasa de descuento constante. Este nivel óptimo se alcanza cuando el rendimiento marginal del stock (la tasa de crecimiento biológico) es igual a la tasa de descuento. Es una condición de equilibrio que asegura una explotación económicamente óptima y ecológicamente sostenible del recurso a largo plazo.

En la gestión de los recursos naturales, uno de los parámetros de medición más importante de la teoría bioeconómica aplicada a la pesca, es la captura máxima que se puede obtener sin agotar el recurso. Sin embargo, es necesario que la información de las pesquerías esté organizada y disponible.

La falta de disponibilidad de datos ha limitado el análisis de las capturas pesqueras en México, dificultando que los investigadores en este campo puedan obtener valores óptimos de capturas y esfuerzos para cada especie (EspinosaRomero y Seijo, 2023).

Frente a esta limitación, este trabajo propone un modelo matemático acompañado de un simulador diseñado para operar incluso con poca información. La herramienta calcula diversas planeaciones de esfuerzo y períodos de veda, asegurando no solo la maximización de ganancias, sino también la preservación de las especies. El modelo se adapta a las condiciones particulares de cada pesquería y genera trayectorias de esfuerzo y biomasa que se mantienen dentro de los límites establecidos de sostenibilidad, siempre que se cumpla la relación entre precios y costos considerada en su formulación.

A diferencia de otros enfoques más complejos, como los de Kvamsdal *et al.* (2020), que operan con bases de datos amplias y requieren procedimientos más elaborados, o Sarkar, Bhattacharya, y Bairagi (2023), que incorporan múltiples actividades económicas en sus modelos, la herramienta desarrollada en este trabajo permite representar distintos escenarios aun cuando no se cuenta con información abundante ni con estructuras de datos completas. Este tipo de herramientas puede considerarse complementario a otros esquemas de evaluación del desempeño pesquero, como los indicadores desarrollados por Anderson *et al.* (2015), aunque con un enfoque más práctico y simplificado.

El simulador propuesto, aunque requiere el desarrollo de ciertas habilidades técnicas, fue pensado para facilitar su uso en pesquerías que enfrentan limitaciones en el acceso a datos, como ocurre frecuentemente en el contexto mexicano (Espinosa-Romero y Seijo, 2023; Defeo y Castilla, 2005). Además, permite analizar diferentes posibilidades de población inicial, tomando en cuenta la principal restricción de la pesquería: el esfuerzo máximo que puede aplicarse. Tanto el modelo como el simulador tienen un amplio campo de aplicación, ya que, si se conocen parámetros como la constante de crecimiento  $r$ , la capacidad del medio  $K$ , el coeficiente de captura  $q$ , los precios y los costos, se puede aplicar a cualquier especie y seguir la planeación que propone la herramienta.

Este enfoque resultaría particularmente útil para las cooperativas de pesca artesanal, que en muchas regiones del país representan la forma de organización predominante entre los pescadores ribereños y son responsables de tomar decisiones relevantes sobre el aprovechamiento del recurso (Basurto *et al.*, 2013). En varios casos, cuentan con concesiones o permisos colectivos y se encargan de establecer fechas de inicio de captura, controlar el número de embarcaciones o definir descansos en la actividad (Secretaría de Gobernación, 2007; McCay *et al.*, 2014). Además, participan activamente en tareas de vigilancia y cumplimiento de vedas, lo que ha sido documen-

tado como parte importante del manejo pesquero (OECD, 2006).

Por ello, contar con una herramienta como este simulador podría fortalecer las capacidades de planeación y organización de estas cooperativas, aun en contextos donde el acceso a información es limitado. Con su uso, podrían decidir el momento más adecuado para iniciar el proceso de captura de acuerdo con sus necesidades, programar los factores de la producción que vayan a requerir inicialmente y a largo plazo, y evaluar si el proyecto es rentable o no, siempre y cuando se tenga conocimiento de la biomasa inicial.

Esto representa una ventaja significativa para muchas pesquerías, ya que les permite anticipar escenarios posibles y tomar decisiones que se adapten mejor a sus condiciones específicas. Es importante resaltar que, para aplicar el modelo y el simulador, basta con que se cumplan unas sencillas relaciones de orden entre el precio y el costo, las cuales se establecen en este artículo. Para ilustrar su uso y eficacia, el modelo y el simulador se aplicaron a dos casos reales: el pepino de mar en Baja California y el mero rojo en Yucatán.

### 3. Variables y supuestos del modelo

Las variables del modelo se consideran para cualquier cardumen en explotación y son las siguientes:

$t$ : el tiempo, con unidad de medida el año.

$X=X(t)$ : La biomasa del cardumen en el instante  $t$ , medida en toneladas. La biomasa denota el tamaño de la población del recurso en el tiempo  $t$ . Específicamente es la biomasa residual que permanece en el hábitat después de cada período de captura.

$Y=Y(t)$ : La captura por unidad de tiempo, medida en toneladas. La captura indica la cantidad extraída del recurso en el tiempo y depende directamente de la biomasa y del esfuerzo.

$E=E(t)$ : El esfuerzo por unidad de tiempo, que puede expresarse en unidades como el número de anzuelos, el número de viajes o el número de embarcaciones empleados por la pesquería para capturar  $Y(t)$  toneladas por unidad de tiempo.

$p=p(t)$ : La función de precio de playa por tonelada del producto, en unidades monetarias. El precio de playa se considera el precio de primera mano recibido por los pescadores y es una función del valor de la producción por volumen desembarcado a valores nominales.

$c=c(t)$ : El costo por unidad de esfuerzo, en unidades monetarias. El costo unitario por esfuerzo se estimó en función de los costos totales, los cuales también dependen del valor de la producción.

Los supuestos del modelo son los siguientes:

**Explotación por un solo dueño:** La explotación es realizada por una sola entidad (por ejemplo, una empresa o cooperativa). Es decir, una vez que comienza el proceso de captura, ningún agente externo al dueño interviene en ese proceso.



**Crecimiento natural (sin captura):** El crecimiento natural de la biomasa,  $\dot{X}$  (la derivada de la biomasa), se rige por la ecuación logística (Quinn y Deriso, 1999):

$$\dot{X} = G(X) = rX \left(1 - \frac{X}{K}\right) \quad (3.1)$$

donde:

$r$  es la constante de crecimiento exponencial.

$K$  es la capacidad de carga del medio, que representa la población máxima que el ecosistema puede sostener de manera natural sin captura, es la biomasa y  $G(X)$  es el crecimiento natural.

**Proporción captura-esfuerzo:** En cualquier momento, la razón de la tasa de captura a la tasa de esfuerzo es proporcional a la biomasa presente (Shaefer, 1954):

$$\frac{Y}{E} = qX \quad (3.2)$$

donde  $q$  es el coeficiente de captura, que representa la fracción de la población que cada unidad de esfuerzo captura en un instante dado.

**Restricción de esfuerzo máximo:** La pesquería tiene un límite máximo de esfuerzo,  $E_{máx}$ , que puede costear.

**Tasa de descuento constante:** La tasa de descuento,  $\delta$ , permanece constante a largo plazo. Se utiliza para calcular el valor presente de los ingresos futuros, permitiendo comparar cantidades monetarias en diferentes períodos.

**Estándar de preservación de la especie:** Para garantizar la sostenibilidad del recurso, se establece que la biomasa residual en cada período debe ser mayor o igual a una proporción  $\rho$  de la capacidad de carga  $K$ , donde  $0 < \rho < 1$ . Esta condición asegura que se mantenga un nivel mínimo de biomasa para la preservación de la especie. Matemáticamente, esto se expresa como:

**Funciones de precio y costo a largo plazo:** Las funciones de precio y costo permanecen válidas a largo plazo y satisfacen las siguientes relaciones de orden de crecimiento:  $X \geq \rho K$

$$c = o(p), \dot{c} = o(p), \dot{p} = o(p) \quad (3.3)$$

cuando  $t \rightarrow \infty$ ; es decir,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{c}{p} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\dot{c}}{p} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\dot{p}}{p} = 0 \quad (3.4)$$

**Parámetros:** Los parámetros  $r, K, q, p$  y  $c$  deben ser conocidos.

**Nota 3.1:** Es fácil demostrar que si  $p=p(t)$  y  $c=c(t)$  y son polinomios con el grado de al menos una unidad mayor que el grado de  $X$ , entonces se cumple la condición (3.4). Todas las funciones de precios y costos, en la práctica, se pueden modelizar mediante un ajuste de mínimos cuadrados a polinomios; y es evidente que el grado de la de precios debe ser por lo menos una unidad mayor que la de costos para que, a la larga, haya ganancias en cualquier proceso productivo. Lo cual garantiza que la aplicabilidad del modelo tenga un espectro sumamente amplio.

#### 4. El modelo

El crecimiento con captura,  $\dot{X} = \frac{dX}{dt}$ , de la biomasa,  $X$ , es el ritmo de crecimiento natural del caridumen menos la captura por unidad de tiempo; esto es  $\dot{X} = G(X) - Y$ . Entonces, por la relación (3.2) de los supuestos del modelo

$$\dot{X} = G(X) - qEX \quad (4.1)$$

es la velocidad de crecimiento de la biomasa con captura (Schaefer, 1954). Por otra parte, la ganancia por unidad de tiempo es el precio por la captura menos el costo por el esfuerzo por unidad de tiempo, por lo que nuevamente por (3.2)

$$pY - cE = pqEX - cE$$

así que

$$\int_0^{\infty} (pqX - c)Ee^{-\delta t} dt$$

es el valor presente con tasa de descuento  $\delta$ . Por tanto, para optimizar la ganancia se debe resolver el problema de control óptimo

$$\text{máximizarse} \int_0^{\infty} (pqX - c)Ee^{-\delta t} dt \quad (4.2)$$

$$\text{sujeto a} \quad \dot{X} = G(X) - qEX \quad (4.3)$$

con la restricción  $E \leq E_{\text{máx}}$  en todo instante y con una biomasa inicial  $X_0$ . Al despejar la variable  $E$  de la ecuación de control (4.3) y sustituirla en la función de utilidad dentro del integrando de la expresión (4.2), el problema se transforma en uno de cálculo variacional

$$\text{máx} \int_0^{\infty} \left( p - \frac{c}{qX} \right) (G(X) - \dot{X}) e^{-\delta t} dt \quad (4.4)$$

$$\text{sujeto a} \quad X(0) = X_0.$$

Si  $X_{\delta} = X_{\delta}(t)$  es la solución de este problema debe satisfacer las siguientes condiciones necesarias (Chiang, 2000; Takayama, 1974), donde es el integrando de (4.4).



**Condiciones necesarias:**

1.  $X_\delta$  es solución de la ecuación de Euler:

$$\frac{\partial F}{\partial X} = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial F}{\partial \dot{X}} \right)$$

donde,  $F(t, X, \dot{X}) = \left( p - \frac{c}{qX} \right) (G(X) - \dot{X}) e^{-\delta t}$ .

Y las condiciones de **transversalidad**:

2.  $\lim_{t \rightarrow \infty} \left( F(t, X_\delta(t), \dot{X}_\delta(t)) - \dot{X}_\delta(t) \frac{\partial F}{\partial \dot{X}}(t, X_\delta(t), \dot{X}_\delta(t)) \right) = 0$ .

3. Una, al menos, de las siguientes dos condiciones:

a)  $\lim_{t \rightarrow \infty} X_\delta(t) = X_\delta^*$  es finito.

b)  $\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\partial F}{\partial \dot{X}}(t, X_\delta(t), \dot{X}_\delta(t)) = 0$ .

4.  $X(0) = X_0$

Al resolver de la ecuación de Euler, de la primera condición necesaria, se obtiene la trayectoria óptima para la biomasa

$$X_\delta = \frac{1}{4} \left[ \bar{X} + K \left( 1 - \frac{\delta}{r} + \frac{\dot{p}}{rp} \right) + \sqrt{\left[ \bar{X} + K \left( 1 - \frac{\delta}{r} + \frac{\dot{p}}{rp} \right) \right]^2 + \frac{8K}{r} \left( \delta \bar{X} - \frac{\dot{c}}{pq} \right)} \right] \quad (4.6)$$

donde  $\bar{X} = \frac{c}{pq}$ .

Bajo las condiciones dadas en (3.3) se puede mostrar (cf. el apéndice A) que:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} X_\delta(t) = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\delta}{r} \right) K =: X_\delta^* \in \mathbb{R} \quad (4.7)$$

Y, si  $\vec{u}(t) = (t, X_\delta(t), \dot{X}_\delta(t))$ ,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left( F(\vec{u}(t)) - \dot{X}_\delta(t) \frac{\partial F}{\partial \dot{X}}(\vec{u}(t)) \right) = 0$$

Por lo que  $X_\delta$  satisface las condiciones necesarias 1, 2 y 3a. Asumiendo entonces que el problema (4.4) tiene solución, ésta se alcanza en la trayectoria  $X_\delta = X_\delta(t)$  dada por (4.6), y de (4.1), la trayectoria óptima para los esfuerzos

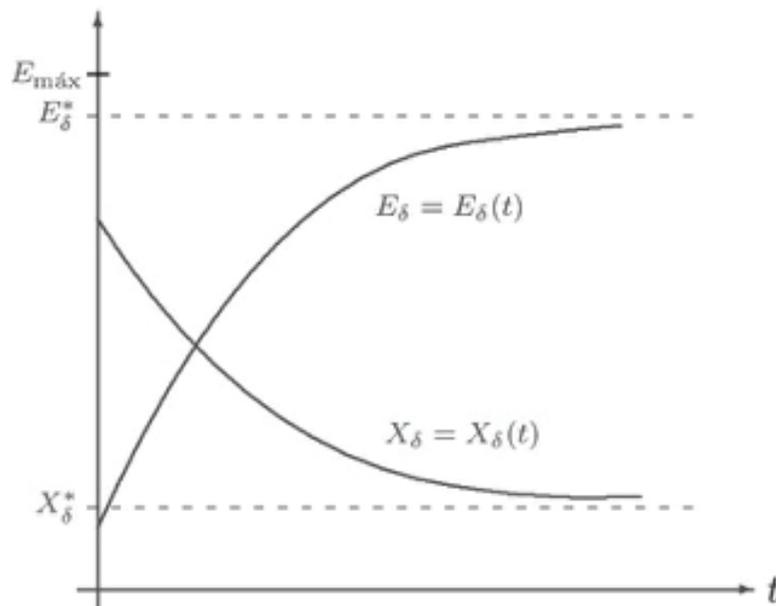
$$E_\delta(t) = \frac{G(X_\delta) - \dot{X}_\delta}{qX_\delta} \quad (4.8)$$

Se puede demostrar que  $X_\delta$  es decreciente,  $E_\delta$  es creciente y que  $\dot{X}(t) \rightarrow 0$  cuando  $t \rightarrow \infty$ , por lo que

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E_\delta(t) = \frac{G(X_\delta^*)}{qX_\delta^*} := E_\delta^*$$

Así,  $X_\delta$  converge decreciendo asintóticamente a la constante  $X_\delta^*$  y  $E_\delta$  converge creciendo asintóticamente a la constante  $E_\delta^*$ , como se ilustra en la gráfica 1. En ésta se puede observar a la trayectoria de la biomasa óptima  $X_\delta = X_\delta(t)$  convergiendo en forma decreciente a la asíntota horizontal  $X_\delta^*$  y a la trayectoria del esfuerzo óptimo  $E_\delta = E_\delta(t)$  convergiendo a la asíntota horizontal  $E_\delta^*$ . Es decir, la biomasa óptima (la biomasa residual en cada periodo que se obtiene al aplicar el esfuerzo óptimo), estará en todo instante por arriba del valor  $X_\delta^*$ ; mientras que el esfuerzo óptimo estará siempre por debajo del valor  $E_\delta^*$ . Entonces, al aplicar la trayectoria óptima de esfuerzos, se obtendrá la biomasa residual óptima y la ganancia máxima correspondiente (valor presente con horizonte de tiempo infinito). De aquí se nota que el mínimo esfuerzo que debe tener la pesquería es cualquier valor mayor o igual a  $E_\delta^*$  y que, para fijar un estándar de preservación de la especie, éste debe ser mayor o igual a  $X_\delta^*$ .

**Gráfica 1.** Cotas para esfuerzo y biomasa en cualquier instante del tiempo.



Fuente: Elaboración propia.

En síntesis, se tienen las dos implicaciones fundamentales:

1. Si  $E_{\text{máx}} \geq E_{\delta}^*$ , la trayectoria óptima de esfuerzos  $E_{\delta}(t)$  siempre estará por debajo del esfuerzo máximo de la pesquería.
2. Si  $X_{\delta}^* \geq \rho K$  a trayectoria óptima de biomasa  $X_{\delta}(t)$  siempre estará por arriba del estándar de preservación de la especie.

Esto significa que se podrá alcanzar la máxima ganancia con sostenibilidad ecológica siguiendo las trayectorias óptimas  $(X_{\delta}(t), E_{\delta}(t))$ , estando en todo instante por debajo del límite de esfuerzos de la pesquería y por arriba de la cantidad mínima de biomasa residual para preservación de la especie; y estas importantes implicaciones siempre se cumplen, como se hizo patente en el apartado 3, cuando el precio y el costo satisfacen las relaciones (3.4); condiciones que normalmente se satisfacen en la práctica (cf. Nota 3.1).

Sin embargo, difícilmente, cuando la pesquería quiera empezar el proceso de captura, la biomasa  $X_0$  será igual a la biomasa de la trayectoria óptima  $X_{\delta}$  en ese momento (condición necesaria 4, apartado 4). Si la primera es mayor, se debe capturar para alcanzar, en el menor tiempo posible  $T$ , la biomasa  $X_{\delta}(T)$  y así comenzar con la planeación óptima de esfuerzos  $E_{\delta}$ . Si es menor, se deben establecer periodos de veda o capturar hasta que se alcance la biomasa óptima en el menor tiempo posible  $T$  y, a partir de ahí, empezar con la planeación óptima de esfuerzos.

Este problema es realmente complejo y en este trabajo de investigación no solo se resuelve, también se implementa en un simulador en Matlab®, para que las pesquerías puedan utilizarlo y analizar los posibles escenarios que les interesen, con el fin de realizar la explotación de la especie de manera planificada y alcanzar ganancias máximas con sostenibilidad ecológica, reduciendo, cuando sea necesario, a un mínimo los periodos de veda.

## 5. Planteamiento general para planeaciones de capturas y vedas

### 5.1 Planteamiento fundamental

Si una pesquería decide comenzar a aplicar la planeación óptima en determinado año  $\alpha$  y  $X_0$  es la biomasa presente al inicio del proceso, ésta difícilmente coincidirá con la biomasa de la trayectoria óptima en ese momento. Si  $X_{\delta} \neq X_0$ , se tendrá que aplicar una combinación de vedas o capturas hasta alcanzar la biomasa residual que coincida con la  $X_{\delta}(\alpha')$  para algún año posterior  $\alpha'$  y, a partir de ahí, aplicar la planeación óptima de esfuerzos  $E_{\delta}(t)$ . Esto no se puede hacer artesanalmente, pues, en realidad, es un problema complejo. Y no es suficiente hacer explícita la forma de resolverlo; sino que se debe proveer un proceso automatizado amigable para cualquier pesquería que quiera adoptar el modelo.

## 5.2 Solución al problema de planeación

### Algoritmo

Sean  $X_\delta(\alpha, t)$  la biomasa óptima en el año en cualquier instante del tiempo  $t$ , esto es, la trayectoria óptima  $X_\delta$  con  $t=0$  en el año  $\alpha$ ;  $E_\delta(\alpha, t)$  la correspondiente planeación óptima de esfuerzos y  $X_0$  la biomasa al inicio del año  $\alpha$  (biomasa residual del año anterior) y  $E_{\max}$  el máximo esfuerzo que puede aplicar la pesquería.

Si  $X_t$  es la biomasa residual en el año  $t$ , entonces (aproximadamente)

$$X_{t+1} = X_t + G(X_t) - Y_{t+1} \quad (5.1)$$

esto es

$$X_{t+1} = X_t + G(X_t) - qE_{t+1}X_{t+1} \quad (5.2)$$

De donde

$$E_{t+1} = \frac{X_t + G(X_t) - X_{t+1}}{qX_{t+1}} \quad (5.3)$$

y

$$X_{t+1} = \frac{X_t + G(X_t)}{1 + qE_{t+1}} \quad (5.4)$$

1. Si  $X_0 = X_\delta(\alpha, 0)$ , entonces se puede aplicar a partir del año  $\alpha$  a la planeación óptima de esfuerzos.  $E_\delta(\alpha, t)$ , (Esta posibilidad, naturalmente, es casi imposible que suceda en la práctica).
2. Si  $X_0 > X_\delta(\alpha, 0)$ , sea

$$E_0 = \frac{X_0 + G(X_0) - X_\delta(\alpha + 1, 0)}{qX_\delta(\alpha + 1, 0)} \quad (5.5)$$

a) Si  $E_0 \leq E_{\max}$ , durante el año  $a$  se aplica el esfuerzo  $E_0$  y a partir del año  $a + 1$  la planeación óptima de esfuerzos  $E_\delta = E_\delta(t)$ .

b) Si  $E_0 > E_{\max}$ , sea para cada  $j = 1, 2, \dots$

$$X_j = \frac{X_{j-1} + G(X_{j-1})}{1 + qE_{\max}}$$

y

$$E_j = \frac{X_j + G(X_j) - X_\delta(a + j + 1, 0)}{1 + qX_\delta(a + j + 1, 0)}.$$

Entonces, si  $j_0$  es el primer entero tal que  $E_{j_0+1} \leq E_{\max}$ , se aplica el esfuerzo de captura máximo de la pesquería  $E_{\max}$  los años  $a, a + 1, \dots, a + j_0$ ; el esfuerzo  $E_{j_0+1}$  en el año  $a + j_0 + 1$  y la planeación de esfuerzos óptimos  $E_\delta = E_\delta(t)$  a partir del año  $a + j_0 + 2$ .

3. Si  $X_0 < X_\delta(a, 0)$ , sea<sup>2</sup>

$$t_0 = [x] = \left\lceil -\frac{1}{r} \ln \frac{X_0(K - X_\delta(a, 0))}{X_\delta(a, 0)(K - X_0)} \right\rceil \quad (5.6)$$

donde  $[x]$  es el mayor entero más cercano<sup>3</sup> a  $x$ . Sean

$$X_1 = \frac{K}{1 + \frac{K - X_0}{X_0} e^{-rt}},$$

$$X_2 = X_\delta(a + t_0 + 1, 0)$$

y

$$E = \frac{X_1 + G(X_1) - X_2}{1 + qX_2}$$

a) Si  $E \leq E_{\max}$ , entonces se aplican vedas en los años  $a, a + 1, a + 2, \dots, a + t_0$ ; el esfuerzo  $E$  en el año  $a + t_0 + 1$  y la planeación óptima de esfuerzos a partir del año  $a + t_0 + 2$ .

b) Si  $E > E_{\max}$ , se aplica el inciso b del inciso 2 con  $X_0 = X_1$ ; con vedas en los periodos del inciso precedente y después siguiendo la planeación de capturas que resulten de seguir el inciso 2b de este algoritmo.

### 5.3 App Simulador de escenarios

La implementación computacional del algoritmo es compleja y laboriosa. Para su programación en Matlab® se requirió el desarrollo original de 13 programas, utilizados para construir la App que corre sobre este paquete. El programa principal se encuentra documentado en el apéndice B y

<sup>2</sup> La expresión dentro del paréntesis especial  $[\cdot]$  es la función inversa de la solución de la ecuación logística.

<sup>3</sup> Por ejemplo  $[3.01]=4$ .

cuadro A1. Esta aplicación fue diseñada con el propósito de ser lo más amigable e interactiva posible para cualquier pesquería interesada en aplicar el modelo en la práctica, permitiéndole obtener la información necesaria para simular distintos escenarios a corto, mediano o largo plazo. Así, es posible planear tanto los períodos que requieran vedas como aquellos en los que pueda iniciarse la captura de inmediato, e implementar en ambos casos la trayectoria óptima de esfuerzos en el menor tiempo posible para alcanzar ganancias máximas con sostenibilidad del recurso.

La información que las pesquerías pueden obtener mediante la aplicación de este modelo bioeconómico a través de la *App* es la siguiente:

- 1) El valor mínimo que deben tener como esfuerzo máximo,  $E_{\max}$ , por medio de la cota superior de esfuerzos  $E_{\delta}^*$ .
- 2) La cota inferior,  $X_{\delta}^*$ , de las biomazas residuales de la trayectoria óptima  $X_{\delta} = X_{\delta}(t)$ , que es también es el valor máximo que puede tener el estándar de la preservación de la especie.
- 3) La planeación de esfuerzos previa a la implementación de la trayectoria óptima de esfuerzos, en caso de que la biomasa al inicio del proceso sea inferior a la biomasa óptima en ese momento; esta planeación consiste en algunos períodos de veda seguidos de otros de captura.
- 4) La planeación de esfuerzos previa a la implementación de la trayectoria óptima de esfuerzos, en caso de que la biomasa al inicio del proceso sea mayor a la biomasa óptima en ese momento; esta planeación consiste en algunos períodos de captura con el máximo esfuerzo, seguida de otros con un esfuerzo menor.
- 5) La planeación óptima de esfuerzos,  $E_{\delta} = E_{\delta}(t)$ , que sigue de la planeación previa, en los dos casos de los dos incisos precedentes, para obtener la máxima ganancia con sostenibilidad del recurso a largo plazo.
- 6) La correspondiente ganancia acumulada.

El algoritmo, está diseñado para que el tiempo que transcurre de la aplicación de la planeación previa a la de esfuerzos óptima sea el menor posible. Lo cual implica, en los casos de vedas, que el número de éstas sea mínimo y que además cuando terminen estos períodos, no se vuelvan a imponer otros, pues para ese entonces se estará siguiendo la trayectoria óptima de esfuerzos y la biomasa residual siempre estará por encima del estándar de preservación de la especie. La figura 1 contiene la aplicación *Simulador\_de\_escenarios*, en la cual el usuario captura los parámetros del modelo: *Capacidad\_Medio*, *Cte\_Crec\_Exp*, *Coef\_Captura* y *Tasa\_Descuento* que son los parámetros  $K$ ,  $r$ ,  $q$  y  $\delta$ , respectivamente. Al hacer clic en el botón *Max\_Esf*, la aplicación desplegará la cota  $E_{\delta}^*$  en la casilla etiquetada como *E\_delta\_Ast*; mientras que al hacer lo propio en el botón con la leyenda *Estandar\_Preservacion\_Especie* la aplicación proporcionará la cota  $X_{\delta}^*$  en la casilla etiquetada con *X\_delta\_Ast*. Des-

pués de que el usuario capture las funciones de precios y costos, ambas calculadas de tal manera que  $t=0$  en el valor que el usuario capture en la casilla *Anio\_Cero* (cf. Nota 5.1); el año donde desea comenzar el proceso; la longitud del período que desea que dure éste; la biomasa inicial (biomasa de la especie en ese momento) y el máximo esfuerzo en las casillas correspondientes y haga clic en *Crear\_Archivo*, la aplicación abrirá el archivo de Excel *Planeacion\_Total.xlsx* que contiene la planeación previa, la óptima y las ganancias acumuladas máximas.

**Nota 5.1:** Como se indicó en la nota 3.1, los modelos de precios y costos se pueden estimar mediante un ajuste de mínimos cuadrados a polinomios. Por ejemplo, si para el precio se tienen los siguientes valores (2010,25), (2012,29), (2015,28.5), (2018,35), (2022,38), donde las primeras coordenadas son años y las segundas unidades monetarias, se ajusta a un polinomio  $p_1=p_1(t)$ , y en su lugar se ajustan los datos (0,25), (2,29), (5,28.5), (8,35), (12,38) a un polinomio del mismo grado  $p=p(t)$ , entonces  $p_1(210+t)=p(t)$  para todo  $t$  y por eso para el polinomio  $p, t=0$  en 2010.

Figura 1. App Simulador de escenarios.

The image shows a MATLAB App window titled 'MATLAB App'. The interface contains several input fields and buttons arranged in two columns. The left column includes: 'Capacidad\_Medio =' with value 4585; 'Cte\_Crec\_Exp =' with value 0.85; 'Coef\_Captura =' with value 0.00285; 'Tasa\_Descuento =' with value 0.1; a 'Max\_Esfuerzo:' label; 'E\_delta\_ast =' with value 0 and '(al menos)' text; an 'Estandar\_Preservacion\_Especie' button; and 'X\_delta\_ast =' with value 0.00 and '(a lo más)' text. The right column includes: 'Precio =' with a polynomial formula  $16.96*t^2+691.14*t-269.94$ ; 'Costo =' with a polynomial formula  $1636.7*t-13270.13$ ; 'Anio\_Cero =' with value 1989; 'Anio\_Inicial =' with value 2024; 'Long\_Periodo =' with value 10; 'Biomasa\_Ini =' with value 3000; and 'Max\_Esf' with value 200. At the bottom right, there is a 'Crear\_Archivo' button and the filename 'Planeacion\_Total.xlsx'.

Fuente: Elaboración propia.

## 6. Casos de estudio

Se aplicó el modelo y el simulador a dos especies, el Pepino de mar en Baja California y el Mero rojo en Yucatán. Para poder hacer esto, se requieren estimar los parámetros: el modelo de precios  $p=p(t)$ , el modelo de costos  $c=c(t)$ , la capacidad del medio  $K$ , el coeficiente de captura  $q$  y la constante de crecimiento exponencial  $r$ . La principal dificultad que tuvo esta investigación fue el trabajar con poca información, por ejemplo, no se contó con datos de costos, ni de costos por unidad de esfuerzos, de biomasa en períodos sin captura, etc. Sin embargo, todos los parámetros del modelo se estimaron de datos reales. Se calcularon los parámetros de crecimiento exponencial y capacidad del medio y se modeló indirectamente una función de costos interpolando una función de precios. Tanto la metodología de estimación y todos los parámetros del Pepino de mar fueron adoptados directamente de Del Valle (2018). La misma metodología fue replicada para obtener los parámetros del Mero rojo en Yucatán, utilizando los datos de precios, capturas, ganancias y biomasa, contenidos en el estudio de Torres Irineo y Medellín Ortiz (2023).

Se eligieron estas dos especies porque fueron las únicas en las que se encontró información suficiente y adecuada para estimar los parámetros y modelizar las funciones de precios y costos. En ambos casos fue posible acceder a datos de ganancias, lo que permitió estimar los costos con base en los ingresos y capturas. También se encontró información sobre el esfuerzo (medido en número de embarcaciones), lo que facilitó calcular los costos por unidad de esfuerzo. Además, gracias a que se contaba con datos de biomasa y capturas, se pudieron estimar la capacidad del medio, la constante de crecimiento y el coeficiente de captura. Por estas características, y como se menciona en el apartado 3, el simulador resulta especialmente útil en contextos de pesquerías artesanales o de pequeña escala, y puede ser de gran apoyo para cooperativas que tienen poca información disponible. Los valores de los parámetros, así como las funciones que se probaron en el simulador están contenidos en el cuadro 1.

**Cuadro 1.** *Valores estimados de  $r$ ,  $q$ ,  $K$ , funciones de precios y costos para dos especies mexicanas.*

Parámetros estimados	Especie	
	Pepino de mar (Baja California)	Mero rojo (Yucatán)
Función de precios	$16.96t^2 + 691.14t - 269.94$	$569.85t^2 - 3624.34t - 269.94$
Función de costos	$1636.7t - 13270.13$	$215807t + 761141$
Capacidad del medio	4585	21502.45
Constante de crecimiento	0.85	1.93
Coefficiente de captura	0.00285	0.00182

Nota: precio en toneladas, biomasa en toneladas y la unidad de tiempo es el año. Fuente: Elaboración propia.

La función de precios y costos en ambos casos se estimaron con datos del valor de la producción reportados en los anuarios oficiales de pesca correspondientes al Estado de Baja California y al Estado de Yucatán. Los precios corresponden a valores nominales en pesos mexicanos por tonelada desembarcada (precios corrientes), mientras que el costo por unidad de esfuerzo se calculó como la relación entre los costos totales anuales de operación y el número total de embarcaciones activas por año, definiendo al esfuerzo en términos del número de embarcaciones empleadas. En términos generales, los precios han presentado una tendencia al alza.

### 6.1 Simulaciones de escenarios

En el apartado 5.3, se describió la forma en la que se utiliza el simulador de escenarios y la información que este proporciona. En este segmento se muestra la aplicación a las dos especies mencionadas, como casos de estudio, con el objetivo de simular diferentes escenarios con datos reales de éstas. En los dos casos tratados se mantienen los parámetros intrínsecos respectivos: capacidad del medio, constante de crecimiento exponencial, coeficiente de captura y los modelos de precios y costos; mientras que se utilizan diversos valores de la tasa de descuento, el máximo esfuerzo con el que podrían contar las pesquerías y la biomasa inicial de los cardúmenes en el momento que éstas deseen iniciar el proceso de explotación.

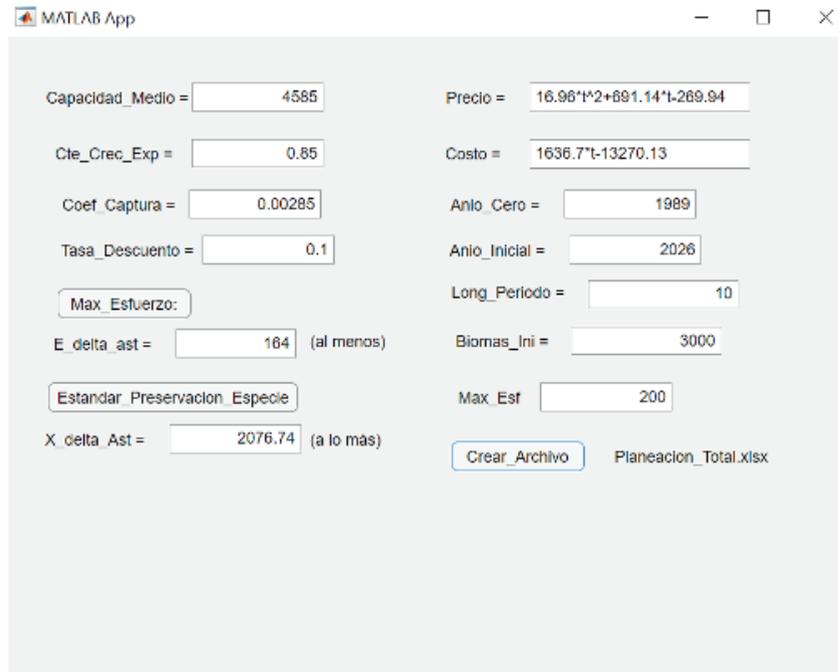
Si el proceso se quiere comenzar en un año  $\alpha$ ,  $X_0$  y  $X_\delta(\alpha)$  y son la biomasa del cardumen al inicio del año y la biomasa que se obtiene al evaluar la biomasa óptima dada en la relación (4.6), al principio de este año, respectivamente, para poder aplicar la trayectoria óptima de esfuerzos (4.8). Como se mencionó en el apartado 5.1, el valor de ambas biombras debe ser el mismo. Si este remoto caso se da, el usuario simplemente captura los datos correspondientes con la biomasa inicial igual a  $X_0$ . Los que realmente se presentan en la práctica son los casos  $X_0 > X_\delta(\alpha)$  o  $X_0 < X_\delta(\alpha)$  y son en estos donde se muestra el funcionamiento del simulador modificando las variables arriba mencionadas.

Cabe aclarar que las biombras y años iniciales, esfuerzos máximos, longitud de periodos y tasas de descuento son valores hipotéticos para realizar las simulaciones. De hecho, en la práctica, las biombras iniciales son mediciones que las pesquerías deben realizar antes de iniciar el proceso y son datos que obviamente no están al alcance ni fueron objetivo de esta investigación.

#### 6.1.1. Pesquería del Pepino de Mar (Baja California)

La figura 2 contiene los datos que se capturaron en el simulador y los resultados que éste proporcionó. La biomasa inicial  $X_0=3000$  es mayor a la biomasa óptima  $X_\delta(2026)$  porque el simulador, en la planeación previa, en el cuadro 2, indica que se debe comenzar a pescar inmediatamente comenzando con el máximo esfuerzo (200 unidades) en 2026, y 169 en el año siguiente para alcanzar la biomasa óptima al final del período 2027 como se observa en el cuadro 2.

**Figura 2.** Simulador para un escenario donde la captura se puede llevar a efecto desde el inicio del proceso con el pepino de mar



Fuente:Elaboración propia.

**Cuadro 2.** Planeación previa y óptima escenario 1

Planeación previa		
Año	Esfuerzo	Biomasa
2026	200	2472.3
2027	169	2321.88

Planeación óptima			
Año	Biomasa	Ganancia (pesos)	Esfuerzo
2028	2318.94	42,502,320.23	148
2029	2316.03	82,465,713.17	148
2030	2313.17	120,013,738.39	148
2031	2310.35	155,267,035.06	148
2032	2307.56	188,342,986.15	149
2033	2304.82	219,355,451.36	149
2034	2302.12	248,414,561.02	149
2035	2299.46	275,626,563.37	149
2036	2296.84	301,093,718.77	149
2037	2294.25	324,914,234.67	149

Fuente: Planeaciones calculadas por el simulador para el escenario 1.

La figura 3 contiene los datos que se capturaron en el simulador y los resultados que éste proporcionó, para una biomasa inicial  $X_0=1000$  que es menor a la biomasa óptima  $X_\delta(2026)$  porque el simulador, en la planeación previa, cuadro 3, indica que deben haber dos periodos de veda en los años 2026 y 2027 (0 esfuerzo en estos dos años es lo que determina el simulador); después, en los periodos 2028 y 2029 se deben aplicar sendos esfuerzos de 200 y 154 unidades para alcanzar la biomasa óptima al final del período 2029, como se observa en la planeación previa del cuadro 3. Posteriormente la pesquería, en el 2030, puede empezar a seguir la planeación óptima de esfuerzos que está contenida en la última columna de la 3, con los demás resultados que ésta contiene, para obtener ganancias máximas en el período fijado, 10 años en este caso. Este tipo de escenarios son menos convenientes para la pesquería, pero aún son asequibles para ésta, porque la duración de las vedas es corta, dos años en este caso, y después puede comenzar a capturar durante dos años más y en el quinto comenzar a aplicar la trayectoria de esfuerzos óptima para generar ganancias acumuladas máximas al final de los 10 años que capturó como longitud de periodo.

**Figura 3.** Simulador para un escenario donde la captura se puede llevar a efecto después de 2 periodos de veda y al siguiente año seguir la planeación óptima de esfuerzos.

Capacidad_Medio =	4585	Precio =	$16.96*t^2+691.14*t-269.94$
Cte_Crec_Exp =	0.85	Costo =	$1636.7*t-13270.13$
Coef_Captura =	0.00285	Anio_Cero =	1989
Tasa_Descuento =	0.1	Anio_Inicial =	2026
Max_Esfuerzo:		Long_Periodo =	10
E_delta_ast =	167 (al menos)	Biomas_Ini =	1000
Estandar_Preservacion_Especie		Max_Est =	200
X_delta_Ast =	2022.79 (a lo más)	Crear_Archivo	Planeacion_Total.xlsx

Fuente: Elaboración propia.

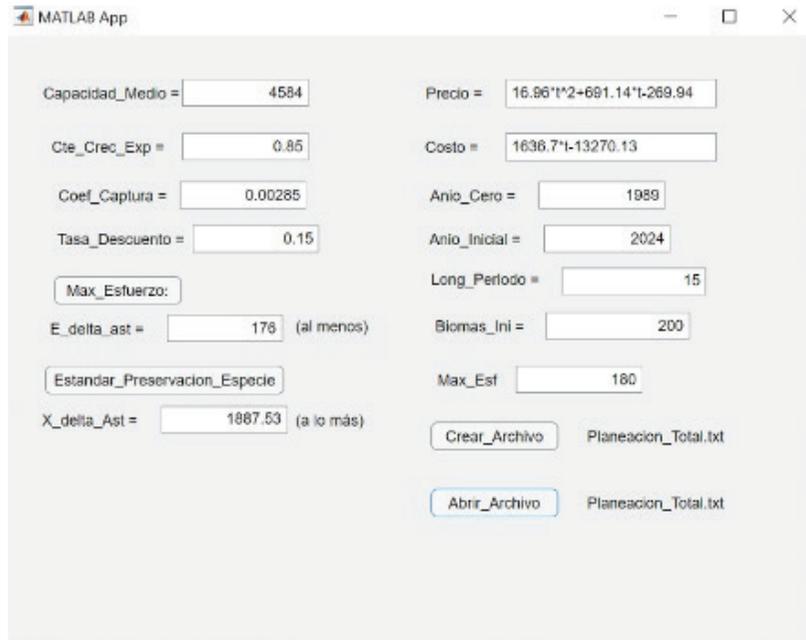
**Cuadro 3.** Planeación previa y óptima escenario 2

Planeación previa			Planeación óptima			
Año	Esfuerzo	Biomasa	Año	Biomasa	Ganancia (pesos)	Esfuerzo
2026	0	1810.62	2030	2313.17	45,861,261.56	148
2027	0	2770.53	2031	2310.35	88,919,735.36	148
2028	200	2358.26	2032	2307.56	129,318,793.24	149
2029	154	2316.03	2033	2304.82	167,197,503.79	149
			2034	2302.12	202,690,380.48	149
			2035	2299.46	235,927,195.21	149
			2036	2296.84	267,032,849.06	149
			2037	2294.25	296,127,292.87	149
			2038	2291.71	323,325,491.12	150
			2039	2289.21	348,737,422.94	150

Fuente: Planeaciones calculadas por el simulador para el escenario 2.

La figura 4 contiene los datos que se capturaron en el simulador y los resultados que éste proporcionó, para una biomasa inicial  $X_0=200$  que es mucho menor a la biomasa óptima  $X_8(2004)$  porque el simulador, en la planeación previa, cuadro 4, indica que deben haber 4 periodos de veda en los años 2024 a 2027 (0 esfuerzo en estos dos años es lo que determina el simulador); después, en los periodos 2028 y 2029 se deben aplicar sendos esfuerzos de 180 y 183 unidades para alcanzar la biomasa óptima al final del período 2029. Posteriormente la pesquería, en el 2030, puede empezar a seguir la planeación óptima de esfuerzos que está contenida en la última columna del cuadro 4, con los demás resultados que ésta contiene, para obtener ganancias máximas en el período fijado, 15 años en este caso. Este escenario puede resultar negativo para la firma porque debe aguardar 4 años de veda más 2 años adicionales, en los que sí captura, para poder entonces seguir, en el séptimo año, la trayectoria óptima de esfuerzos y alcanzar ganancias máximas acumuladas durante la longitud del período que estableció al inicio (15 años). Pero puede suceder que la pesquería no soporte esos 4 años de veda, porque quizá tiene que pagar sueldos y gastos fijos durante ese tiempo y eso probablemente no le convenga. Esa es precisamente la ventaja del simulador, con éste la pesquería puede tomar decisiones bien planeadas antes de comenzar un proceso productivo.

**Figura 4.** Simulador para un escenario donde la captura se puede llevar a efecto después de 4 periodos de veda y después de dos años más seguir la planeación óptima de esfuerzos



Fuente: Elaboración propia

**Cuadro 4.** Planeación previa y óptima escenario 3

Planeación Previa:			Planeación óptima:			
Año	Esfuerzo	Biomasa	Año	Biomasa	Ganancia (pesos)	Esfuerzo
2024	0	442.09	2030	2199.62	44,286,856.38	156
2025	0	915.99	2031	2196.7	83,835,968.56	156
2026	0	1690.55	2032	2193.82	119,129,849.59	156
2027	0	2647.35	2033	2190.97	150,605,465.49	156
2028	180	2378.08	2034	2188.17	178,657,986.20	156
2029	183	2202.57	2035	2185.4	203,644,316.36	156
			2036	2182.67	225,886,402.60	157
			2037	2179.98	245,674,318.23	157
			2038	2177.33	263,269,129.23	157
			2039	2174.71	278,905,547.72	157
			2040	2172.14	292,794,381.29	157
			2041	2169.6	305,124,787.11	157
			2042	2167.1	316,066,341.30	158
			2043	2164.63	325,770,934.05	158
			2044	2162.21	334,374,501.34	158

Fuente: Planeaciones calculadas por el simulador para el escenario 3

### 6.1.2. Pesquería del Mero rojo (Yucatán)

Enseguida se presenta el mismo ejercicio aplicado ahora a la pesquería de mero rojo en Yucatán. Al igual que con el pepino de mar, se ejecutaron dos simulaciones, casos 4 y 5 que corresponden respectivamente a los escenarios previamente analizados (casos 1 y 2), pero con parámetros específicos del mero. En cada uno de estos casos solo se señalarán las biomazas iniciales y las condiciones utilizadas, ya que el procedimiento es el mismo y no es necesario repetir el desarrollo completo; con observar las figuras y tablas será suficiente.

Para este escenario se parte de una biomasa inicial  $X_0=18000$  toneladas, mayor a la biomasa óptima  $X_6(2026)$  correspondiente al inicio del proceso. Se fijó una tasa de descuento de  $\delta = 0.12$ , una longitud del periodo de 15 años y un esfuerzo máximo de 600 embarcaciones. El simulador determina que puede iniciarse la captura de forma inmediata, y genera la planeación respectiva que se muestra en las figuras y tablas correspondientes (figura 5 y cuadro 5).

**Figura 5.** Simulador para un escenario donde la captura se puede llevar a efecto desde el inicio con el Mero rojo en Yucatán

The screenshot shows a MATLAB App window titled "MATLAB App" with standard window controls. The interface is divided into two columns of input fields. The left column includes: "Capacidad\_Medio =" with value "2.150245e+04"; "Cte\_Crec\_Exp =" with value "1.93"; "Coef\_Captura =" with value "0.00182"; "Tasa\_Descuento =" with value "0.12"; "Max\_Esfuerzo:" (empty); "E\_delta\_ast =" with value "564" and "(al menos)"; "Estandar\_Preservacion\_Especie" (empty); and "X\_delta\_Ast =" with value "10082.76" and "(a lo más)". The right column includes: "Precio =" with value "569.85\*t^2-3624.3\*t-269.94"; "Costo =" with value "215807\*t+761141"; "Anio\_Cero =" with value "2002"; "Anio\_Inicial =" with value "2026"; "Long\_Periodo =" with value "15"; "Biomaz\_Ini =" with value "1.8e+04"; and "Max\_Esf" with value "600". At the bottom right, there are two buttons: "Crear Archivo" and "Planeacion Total.xlsx".

Fuente: Elaboración propia

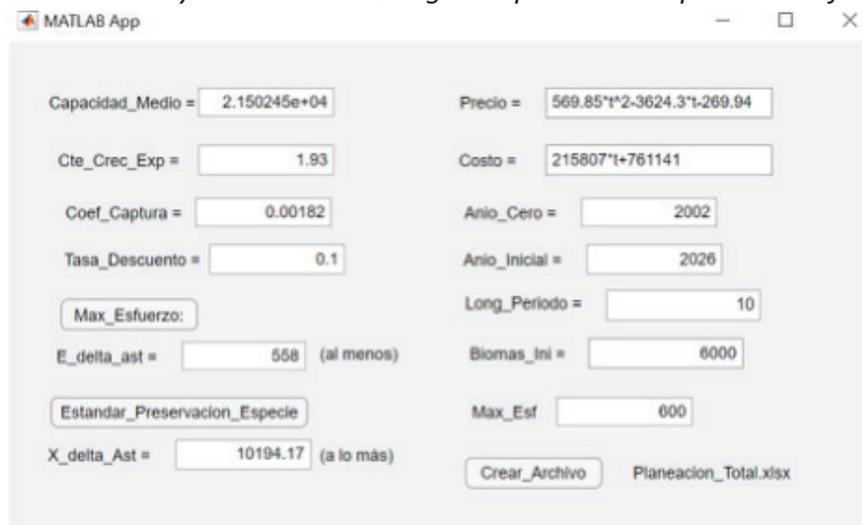
**Cuadro 5.** Planeación previa y óptima escenario 4

Planeación Previa			Planeación Óptima			
Año	Esfuerzo	Biomasa	Año	Biomasa	Ganancia (pesos)	Esfuerzo
2026	600	17759.13	2027	17328.7	514,550,032.59	219
			2028	16943.75	1,085,374,004.90	237
			2029	16597.48	1,703,248,665.24	253
			2030	16284.36	2,359,012,080.63	267
			2031	15999.87	3,043,859,531.02	281
			2032	15740.27	3,749,537,344.28	293
			2033	15502.43	4,468,461,711.96	304
			2034	15283.74	5,193,782,593.48	314
			2035	15081.99	5,919,407,772.06	324
			2036	14895.28	6,639,998,402.58	332
			2037	14721.99	7,350,944,610.02	341
			2038	14560.74	8,048,327,598.82	348
			2039	1441.31	8,728,873,137.74	355
			2040	14269.65	9,389,900,064.43	362
			2041	14137.84	10,029,266,516.15	368

Fuente: Planeaciones calculadas por el simulador para el escenario 4

En este caso se considera una biomasa inicial  $X_0=4000$  toneladas, menor a la biomasa óptima  $X_8(2026)$ . Se utiliza una tasa de descuento  $\delta = 0.10$ , una longitud de 10 años y un esfuerzo máximo de 600 embarcaciones. El simulador indica un periodo de veda inicial, seguido de la aplicación de esfuerzos para alcanzar la biomasa óptima. Los detalles de este escenario se presentan en la figura 6 y en cuadro 6.

**Figura 6.** Simulador para un escenario donde la captura se puede llevar a efecto después de 2 periodos de veda y en el año 2029 seguir la planeación óptima de esfuerzos.



Fuente: Elaboración propia

**Cuadro 6.** *Planeación previa y planeación óptima escenario 5*

Planeación previa			Planeación óptima			
Año	Esfuerzo	Biomasa	Año	Biomasa	Ganancia (pesos)	Esfuerzo
2026	0	15637.9	2029	16321.08	793,074,253.90	265
2027	0	20392.4	2030	16038.84	1,651,824,951.00	279
2028	191	16631.8	2031	15781.37	2,566,819,027.00	291
			2032	15545.54	3,528,727,728.00	302
			2033	15328.74	4,528,525,667.00	312
			2034	15128.78	5,557,630,803.00	321
			2035	14943.77	6,607,998,792.00	330
			2036	14772.09	7,672,182,168.00	338
			2037	14612.37	8,743,362,475.00	346
			2038	14463.39	9,815,361,761.00	353

Fuente: Planeaciones calculadas por el simulador para el escenario 5

## 7. Conclusiones

### 7.1. Análisis y discusión

El modelo y el simulador desarrollados permiten una planeación adecuada del esfuerzo para maximizar la ganancia sin poner en riesgo la existencia de la especie. Las trayectorias óptimas de biomasa y esfuerzo garantizan que se respete tanto el límite del esfuerzo máximo como el estándar de preservación de la especie. Esto se cumple siempre que el precio y el costo verifiquen las relaciones establecidas en (3.3) y se demuestran en el apéndice A, condición que se cumple siempre en la práctica (cf. Nota 3.1).

En los casos del pepino de mar en Baja California y el mero rojo en Yucatán, el modelo funcionó correctamente en el sentido de que fue posible ilustrar el funcionamiento del simulador con parámetros estimados para estas especies, es decir que se lograron construir escenarios coherentes con los datos disponibles. La información, aunque limitada, era accesible y permitió ejecutar las simulaciones. No se trató de una prueba empírica del modelo, y validar sus resultados implicaría aplicarlo en condiciones reales y contrastarlos con datos observados, lo cual está fuera del alcance de este estudio.

Si bien este trabajo no cita una fuente externa que confirme la aplicabilidad del modelo a otras especies, los casos analizados funcionan como una primera verificación de que el modelo puede adaptarse a distintos escenarios. En lugar de apoyarse en evidencia externa, esta investigación demuestra que, con la información mínima estimada, es posible generar las planeaciones necesarias para cada pesquería. En este sentido, el simulador puede aplicarse a otras especies, siempre que se cuente con los datos básicos requeridos: precios, costos, coeficiente de captura,

constante de crecimiento y capacidad del medio. Esta posibilidad está considerada por la generalidad del modelo y en la propia estructura del simulador.

También debe destacarse que la contribución teórica del artículo es significativa. El modelo propuesto se construyó a partir de fundamentos formales y se desarrolló con base en condiciones matemáticas precisas para garantizar que las trayectorias generadas sean sostenibles a largo plazo. Se establecieron relaciones de orden entre precio y costo que aseguran la viabilidad económica del aprovechamiento pesquero, y se diseñó un mecanismo que permite identificar el momento adecuado para comenzar la captura, aun cuando la biomasa inicial no sea la óptima. Además, se resuelve un problema complejo: cómo alcanzar la trayectoria óptima cuando la biomasa inicial no coincide con ella. Esta situación se aborda mediante un algoritmo de planeación previa, también fundamentado teóricamente y aplicado en el simulador. Esta estructura matemática y su implementación constituyen una aportación teórica relevante al análisis y manejo de recursos renovables, dentro de la línea de modelos bioeconómicos inter temporales.

En complemento a lo anterior, se incorporaron cotas asintóticas que permiten verificar que el esfuerzo aplicado esté siempre por debajo del máximo esfuerzo que puede costear la pesquería, y que la biomasa se mantenga por encima del estándar de preservación. El simulador, en este contexto, no solo es una herramienta útil, sino una aplicación directa de los resultados teóricos obtenidos, por lo que su utilidad práctica es consecuencia del trabajo teórico que sustenta el modelo.

## **7.2 Resultados, consideraciones y recomendaciones**

Con el uso del simulador, la pesquería puede:

1. Conocer el valor mínimo que debe tener su esfuerzo máximo.
2. Determinar la cota superior del estándar de preservación de la especie, que corresponde a la cota inferior de la biomasa residual óptima.
3. Obtener la planeación óptima de esfuerzos.
4. Conocer la ganancia acumulada máxima esperada.

Además, en los casos en que el simulador determina vedas en la planeación previa, éstas se reducen a un mínimo, y una vez que terminan, si se sigue la trayectoria óptima de esfuerzos, no se vuelven a imponer. El modelo y el simulador pueden ser usados por cualquier pesquería, basta con conocer los parámetros del modelo y verificar que las condiciones establecidas se cumplan.

Los resultados obtenidos con la aplicación del modelo a las pesquerías del pepino de mar en Baja California y del mero rojo en Yucatán permiten ilustrar cómo esta herramienta puede contribuir al manejo sostenible y rentable de ambas especies. A través de la simulación de trayectorias óptimas de esfuerzo, se obtuvieron ganancias acumuladas máximas, manteniendo en todo momento la biomasa por encima del estándar de preservación.

En el caso del pepino de mar, las simulaciones muestran que, partiendo de una biomasa inferior a la óptima, es necesario establecer períodos de veda antes de iniciar la captura, para luego aplicar la trayectoria de esfuerzos sugerida por el modelo. Bajo esta planeación, se proyecta una ganancia máxima de 45.9 millones de pesos para el 2030. Para el mero rojo, bajo este mismo escenario, la ganancia asciende a casi 200 millones de pesos.

Aunque estas cifras pueden parecer elevadas, es importante aclarar que corresponden al total acumulado anual del sector pesquero involucrado para cada especie, considerando tanto el valor total de la producción como el número de embarcaciones estimadas. Además, representan el máximo posible bajo condiciones ideales. Estos resultados concuerdan con estimaciones como las reportadas por Torres Irineo y Medellín Ortiz (2023), donde las ganancias anuales del mero rojo se proyectan entre 200 y 300 millones de pesos en su mejor escenario.

### 7.3. Limitaciones

Este trabajo es un modelo teórico, por lo tanto, su aplicación en la práctica es necesaria para validar completamente sus resultados.

Otra limitación es la necesidad de estimar los parámetros del modelo a partir de información disponible. Si una pesquería no cuenta con los datos necesarios, deberá primero obtenerlos para poder aplicar el modelo.

El modelo considera condiciones ideales, como la explotación realizada por un solo dueño, funciones conocidas de precios y costos, y parámetros constantes a lo largo del tiempo. En la práctica, estas condiciones pueden no cumplirse en todos los casos, por lo que se requiere cautela al aplicarlo en contextos distintos.

Otra limitante, es que el modelo no puede incluir factores externos como piratería y desastres naturales que juegan un papel muy importante en el proceso de explotación de recursos pesqueros.

### Referencias

- Anderson, L. G. y J. C. Seijo. 2010. *Bioeconomics of Fisheries Management*, Wiley-Blackwell, Nueva York.
- Anderson, J. L., Anderson, C. M., Chu, J., Meredith, J., Asche, F., Sylvia, G. y Valderrama, D. 2015. "The Fishery Performance Indicators: A Management Tool for Triple Bottom Line Outcomes", *PLOS ONE*, 10(5): 1-20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122809>
- Arnason, R. 2009. "Fisheries management and operations research", *European Journal of Operational Research*, 193(3): 741–751. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.07.028>
- Basurto, X., A. Bennett, A. H. Weaver, S. Rodríguez-Van Dyck y J.S. Aceves-Bueno. 2013. "Cooperative and non-cooperative strategies for small-scale fisheries' self-governance in the

- globalization era: Implications for conservation”, *Ecology and Society*, 18 (4): 1-38.  
<https://doi.org/10.5751/ES-05673-180438>
- CIBNOR. 2024. *Línea Estratégica II – Exploración, Dimensionamiento y Desarrollo Sustentable de Nuevas Pesquerías*, en: <https://www.cibnor.gob.mx/investigacion/ecologia-pesquera/lineas-y-proyectos-de-investigacion-pep/254-linea-estrategica-ii-pep>
- Charles, A. T. 2001. *Sustainable Fishery Systems*, Oxford, Blackwell Science.
- Chiang, A. 2000. *Elements of Dynamic Optimization*, Waveland Press, Long Grove.
- Clark, C. W. 1985. *Bioeconomic Modelling and Fisheries Management*, Nueva York, Wiley-Interscience.
- CONAPESCA, 2025. *Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca*, en: <https://www.gob.mx/conapesca>
- Defeo, O. 2015. *Enfoque ecosistémico pesquero: conceptos fundamentales y su aplicación en pesquerías de pequeña escala de América Latina*. Roma: FAO, Documento Técnico de Pesca y Acuicultura No. 592. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i4775s.pdf>
- Defeo, O. y J. C. Castilla. 2005. “More than one bag for the world fishery crisis and keys for management successes in selected artisanal Latin American shellfisheries”, *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 15(3): 265–283. <https://doi.org/10.1007/s11160-005-4865-0>
- Del Valle Morales, M. 2018. “Modelo bioeconómico con optimización dinámica para maximizar ganancias con sostenibilidad ecológica por la explotación del pepino de mar en Baja California, México”, *Tantalus*, II (3): 23–25.
- Espinosa Romero, M. J. y J. C. Seijo. 2023. “Governing fisheries targeting species with different mobility patterns: Institutional settings and governance configurations in Mexico”, *Ciencia Pesquera*, 31(1): 57–75.
- Failler, P., H. Pan y N. Akbari. 2022. “Integrated Social Economic Ecological Modeling for Fisheries: The ECOST Framework”, *Frontiers in Marine Science*, 8: 704371. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.704371>
- FAO. 2022. *El Estado Mundial de la Pesca y la Acuicultura*, en: <https://doi.org/10.4060/cc0461es>
- Fenichel, E. P. y J. K. Abbott. 2014. “Natural capital: From metaphor to measurement”, *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 1(1/2): 1–27. <https://doi.org/10.1086/676034>
- Gordon, H. S. 1953. “An economic approach to the optimum utilization of fishery resources”. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 10(7): 442–457. <https://doi.org/10.1139/f53-026>
- Gordon, H. S. 1954. “The economic theory of a common-property resource: The fishery”, *Journal of Political Economy*, 62(2): 124–142. <http://dx.doi.org/10.1086/257497>
- Hilborn, R., R. O. Amoroso, C. M. Anderson, et al. 2020. “Effective fisheries management instrumental in improving fish stock status”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(4): 2218–2224. <https://doi.org/10.1073/pnas.1909726116>

- Jackson, J. B. C., et al. 2001. "Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems", *Science*, 293(5530): 629–638. <https://doi.org/10.1126/science.1059199>.
- Kvamsdal, S. F., J. M. Maroto, M. Morán y L. K. Sandal. 2020. "Bioeconomic modeling of seasonal fisheries", *European Journal of Operational Research*, 281(2): 332–340. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.08.031>.
- McCay, B. J., F. Micheli, G. Ponce-Díaz, et al. 2014. "Cooperatives, concessions, and co-management on the Pacific coast of Mexico", *Marine Policy*, 44: 49–59. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2013.08.001>.
- OECD. 2006. *The Definition of a Fishery. En Using Market Mechanisms to Manage Fisheries: Smoothing the Path*, en: [https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2006/04/using-market-mechanisms-to-manage-fisheries\\_g1g-h6821/9789264036581-en.pdf](https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2006/04/using-market-mechanisms-to-manage-fisheries_g1g-h6821/9789264036581-en.pdf).
- Pauly, D., V. Christensen, S. Guénette, et al. 2002. "Towards sustainability in world fisheries", *Nature*, 418(6898): 689–695. <https://doi.org/10.1038/nature01017>.
- Sarkar, B., S. Bhattacharya, y Bairagi, N. 2023. "An ecological economic fishery model: Maximizing the societal benefit through an integrated approach of fishing and ecotourism", *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 46(14): 14962–14982, <https://doi.org/10.1002/mma.9356>.
- Quinn, T. J. y R. B. Deriso. 1999. *Quantitative Fish Dynamics*, Oxford, Oxford University Press.
- Schaefer, M. B. 1954. "Some aspects of the dynamics of populations important to the management of commercial marine fisheries", *Bulletin of the Inter-American Tropical Tuna Commission*, 1: 25–56.
- Schaefer, M. B. 1957. "Some considerations of population dynamics and economics in relation to the management of marine fisheries", *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 14(5): 669–681. <https://doi.org/10.1139/f57-025>.
- Secretaría de Gobernación. 2007. *Diario Oficial de la Federación*, "Acuerdo por el que se establece el sistema de concesiones para la pesca ribereña", 24 de julio, México.
- Seijo, J. C. y S. Salas. 1997. *Bioeconomía Pesquera: Teoría, Modelación y Manejo*, Roma, FAO.
- Surís, J. C. y G. Varela. 1995. *Introducción a la economía de los recursos naturales*, Madrid, Cívitas.
- Takayama, A. 1974. *Mathematical Economics*, The Dryden Press, Hinsdale.
- Torres Irineo, E. y A. Medellín Ortiz. 2023. *Estudio de Costo-Beneficio de Escenarios de Recuperación de la Pesquería de Mero en Yucatán*, Environmental Defense Fund México, en: [https://mexico.edf.org/sites/default/files/EstudioCostoBeneficio\\_ReED.pdf](https://mexico.edf.org/sites/default/files/EstudioCostoBeneficio_ReED.pdf).



## Apéndice A. Ecuación de Euler

Para que el problema de cálculo de variaciones (4.4), tenga solución es necesario que se cumplan las condiciones necesarias 1 (ecuación de Euler), y las de transversalidad 2 y 3 de la página 8. No es difícil mostrar que de la ecuación de Euler se desprende que está dada por la relación (3.6) de la página 9; esto es

$$X_\delta = \frac{1}{4} \left[ \bar{X} + K \left( 1 - \frac{\delta}{r} + \frac{\dot{p}}{rp} \right) + \sqrt{\left[ \bar{X} + K \left( 1 - \frac{\delta}{r} + \frac{\dot{p}}{rp} \right) \right]^2 + \frac{8K}{r} \left( \delta \bar{X} - \frac{\dot{c}}{pq} \right)} \right]$$

con  $\bar{X} = \frac{c}{pq}$ . Se afirma que si las funciones de precio  $p = p(t)$  y costo  $c = c(t)$  satisfacen las condiciones (2.3), es decir,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{c}{p} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\dot{c}}{p} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\dot{p}}{p} = 0 \quad (\text{A.1})$$

Entonces se cumplen las condiciones de transversalidad 2 y 3a, p. 8. En efecto, por (A.1):

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \bar{X} = \frac{1}{q} \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{c}{p} = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\dot{p}}{rp} = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\dot{c}}{pq} = 0$$

Por lo que

$$\lim_{t \rightarrow \infty} X_\delta(t) = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\delta}{r} \right) K = X_\delta^* \in \mathbb{R}$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} X_\delta(t) = \frac{1}{2} K \left( 1 - \frac{\delta}{r} \right)$$

Si

$$A = \bar{X} + K \left( 1 - \frac{\delta}{r} + \frac{\dot{p}}{rp} \right) \text{ y } B = \frac{8K}{rpq} \left( \delta \bar{X} - \frac{\dot{c}}{pq} \right)$$

entonces

$$X_\delta = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{4} \left[ A + \sqrt{A^2 + B} \right] \right)$$

$$= \frac{1}{4} \left[ \dot{A} + \frac{2A\dot{A} + \dot{B}}{2\sqrt{A^2 + B}} \right]$$

con

$$\dot{A} = \dot{\bar{X}} + K \left( \frac{\ddot{p}}{rp^2} - \frac{\dot{p}^2}{rp^2} \right)$$

y

$$\dot{B} = \frac{8K}{r} \left( \delta \dot{\bar{X}} + \frac{\dot{c}\dot{p}}{p^2q} \right)$$

y

$$\dot{X} = \frac{\dot{c}}{pq} - \frac{c\dot{p}}{p^2}$$

Nuevamente, por (A1),

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{X} = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{A} = 0 \text{ y } \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{B} = 0$$

por lo que

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{4} \left[ \dot{A} + \frac{2A\dot{A} + \dot{B}}{2\sqrt{A^2 + B}} \right] = \frac{1}{4} \left[ 0 + \frac{0 + 0}{2K \left(1 - \frac{\delta}{r}\right)} \right] = 0$$

Es decir,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \bar{X}_\delta(t) = 0$$

Por tanto, si  $\vec{u} = (t, X_\delta(t), \dot{X}_\delta(t))$  y  $F$  es el integrando de (3.4), p. 8,

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \left[ F(\vec{u}) - \dot{X}_\delta(t) \frac{\partial F}{\partial \dot{X}} \right]_{\vec{u}} &= \lim_{t \rightarrow \infty} \left[ \left( p(t) - \frac{c(t)}{qX_\delta(t)} \right) G(X_\delta(t)) e^{-\delta t} \right. \\ &= \lim_{t \rightarrow \infty} \left[ \left( \frac{p(t)}{e^{\delta t}} - \frac{c(t)}{qX_\delta^* e^{\delta t}} \right) G(X_\delta^*) \right] = 0 \cdot G(X_\delta^*) = 0 \end{aligned}$$

## Apéndice B. Código de programa

La figura A1, contiene el programa principal en Matlab® para el diseño del simulador de esta investigación, sección 4.3. Por cuestiones de espacio se escribió el código en dos columnas; pero en realidad debe ser escrito, para su funcionamiento en Matlab®, en una sola. De esta manera todas las líneas de la segunda columna deben estar escritas, en forma secuencial, después de la última línea de la primera columna.

**Cuadro A1:** Programa principal para el diseño del simulador de esta investigación

<pre>function planeacionCDTotTable(P,C,A0,AI,K,r,... q,d,X_0,Fin,MaxEsf) X1=XdeltaD(P,C,A0,AI,K,r,q,d,0); T=1:Fin; if X1==X_0     A=0; elseif X_0&lt;X1     A=-1; elseif X_0&gt;X1     A=1; end switch A case 0     M1=XdeltaD(P,C,A0,AI,K,r,q,d,T);     E=EdeltaD(P,C,A0,AI,K,r,q,d,T);     GanD=ganancumD(P,C,A0,AI,K,r,q,d,T);     MB=[(AI-1+T),M1,GanD,E];     fprintf('Planeación Óptima:')     fprintf('\n%4s %10s %12s %4s\n', Año,... 'Biomasa','Ganancia','Esfuerzo');     fprintf('%4d %10.2f %14.2f %6.0f \n',MB); case -1     t0=ceil(TiempoVedaD(r,K,X1,X_0));     X1=logisD(r,K,X_0,t0);     X2=XdeltaD(P,C,A0,AI+t0+1,K,r,q,d,0);     E=EsfPostVedaD(X1,X2,r,K,q);     if E&lt;=MaxEsf         B=1;     else         B=-1;     end switch B case 1     t1=1:t0+1;     Mveda=[logisD(r,K,X_0,1:t0),X2];     Eveda=[zeros(1,t0),E];     M1=[(AI-1+t1),Eveda,Mveda];</pre>	<pre>Periodo=M1(:,1); Esfuerzo=M1(:,2); Biomasa=M1(:,3); Tabl1=table(Periodo,Esfuerzo,Biomasa); writetable(Tabl1,'Planeacion_Total1.xlsx',... 'WriteMode','overwritesheet','Sheet',1) winopen Planeacion_total1.xlsx  case -1     X4=bimasaVsEsD(X1,MaxEsf,r,K,q);     X5=XdeltaD(P,C,A0,AI+t0+2,K,r,q,d,0);     E2=EsfPostVedaD(X4,X5,r,K,q);     t1=1:t0+2;     Mveda=[logisD(r,K,X_0,1:t0),X4,X5];     Eveda=[zeros(1,t0),MaxEsf,E2];     M1=[(AI-1+t1),Eveda,Mveda];     Periodo=M1(:,1);     Esfuerzo=M1(:,2);     Biomasa=M1(:,3);     Tabl1=table(Periodo,Esfuerzo,Biomasa);  writetable(Tabl1,'Planeacion_Total1.xlsx','WriteMode','overwritesheet','Sheet',1) X5=XdeltaD(P,C,A0,AI+t0+2,K,r,q,d,T); E5=EdeltaD(P,C,A0,AI+t0+2,K,r,q,d,T); T0=AI+t0+2; GanD=ganancumD(P,C,A0,T0,K,r,q,d,T); M2=[(AI+t0+1+T),X5,GanD,E5,]; Periodo=M2(:,1); Biomasa=M2(:,2); Ganancia=M2(:,3); Esfuerzo=M2(:,4); Tabl2=table(Periodo,Biomasa,Ganancia,Esfuerzo);  writetable(Tabl2,'Planeacion_Total1.xlsx','WriteMode','overwritesheet','Sheet',2) winopen Planeacion_total1.xlsx end case 1     planX0mayorDPrevBTable(P,C,A0,AI,K,r,q,d,X_0,Fin,MaxEsf); end</pre>
--	--

Fuente: Diseño original