

Pesca del camarón en Campeche

John Esteban Castro, Maria Isabel Arango

jecastor@eafit.edu.co, miarangop@eafit.edu.co

Modelación y simulación III.

Departamento de Ciencias Matemáticas.

Universidad Eafit

Abstract—La actividad pesquera es una de las actividades económicas más ancestrales de la mayoría de poblaciones alrededor del mundo, se tienen registros, los cuales indican que desde la Edad de Piedra o Etapa Lítica los hombres ya capturaban peces con las manos, posteriormente surgieron herramientas tales como flechas y arpones que facilitaron esta labor [1].

Debido a la importancia de la pesca, con el paso del tiempo esta ha mejorado sus instrumentos. Actualmente existen gran variedad de anzuelos, arpones y los barcos son mucho más potentes. Así, ha dejado de ser en una simple cuestión de supervivencia y se ha convertido en una industria, lo que conlleva a la sobreexplotación del recurso. Por esta razón, muchas especies de animales marinos se han visto en peligro de extinción y se han tenido que aplicar ciertos controles para la regulación; un ejemplo de esta situación es lo que sucede en el golfo de México, específicamente en la ciudad de Campeche, en donde la pesca del camarón es una de sus actividades principales desde hace más de 50 años y debido a la industrialización, la población de camarones en esta zona se ha visto realmente afectada con una tendencia a disminuir debido a los pocos controles que se han tenido.

Palabras clave: Camarón, economía, industrialización, pesca, sobreexplotación.

I. OBJETIVOS

- 1) *General.* Analizar de manera detallada mediante un modelo basado en dinámica de sistemas, el comportamiento de la población de camarones en la zona de Campeche en un periodo de tiempo determinado, para poder así entender las causas de su disminución y los efectos que han tenido las diferentes soluciones implementadas.
- 2) *Específicos.*
 - Visualizar los impactos de las diferentes políticas y soluciones implementadas a lo largo de los años para mitigar la sobreexplotación de la población de camarones.
 - Proponer soluciones que moderen el problema de la disminución en la población de camarones en Campeche.
 - Modelar y simular el problema estudiado, haciendo uso de diagramas causales y de flujos y niveles, para determinar y visualizar la dinámica de la población de camarones.

II. INTRODUCCIÓN

Campeche es un Estado de México ubicado en la península de Yucatán, rico en zonas naturales y arqueológicas, el 40% de su territorio son áreas naturales protegidas [2]. En la historia de este territorio se ha visto reflejado lo fundamental que han sido los recursos naturales para su desarrollo. En la época de la colonia, se destaca el comercio de tintes y la explotación de madera; para finales de la segunda guerra mundial, gracias al reemplazo de las sustancias químicas, decayó el mercado, lo que los llevó a buscar otro sustento económico y es allí donde aparece la pesca de camarón y años más tarde la explotación del petróleo, las cuales se convertirían en las principales actividades económicas que le permiten a México generar gran cantidad tanto de divisas como de empleo [3].

III. PROBLEMA

El inicio de la pesquería de camarón comienza en la década de los 40 en donde la abundancia del recurso era evidente, lo que permitió que el desarrollo de esta actividad fuera veloz. Los primeros barcos camaroneros aparecen en 1947, y se componían de tres flotas, una estadounidense, otra cubana y una mexicana. Era evidente que las tres flotas ejercían un alto consumo y una gran presión sobre el recurso, lo que llevó a que tres décadas más tarde se decidiera la salida de las dos flotas extranjeras, ya que se había empezado a observar un decremento en las capturas de camarón. A partir de ahí, como no se mantuvieron los conceptos de pesca y desarrollo sustentable, el rendimiento de la pesquería siguió decayendo lo que llevó a la reducción del recurso (Fig 1) y adicionalmente, a la reducción de más del 40% de la flota pesquera (Fig 2) [4].

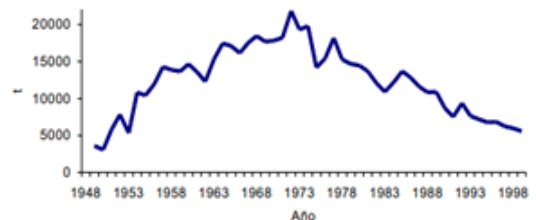


Fig. 1. Producción anual de camarón en Campeche de 1948 a 1998 [5].

Se ha atribuido la culpa de la disminución en el número de camarones a diversos entes como la contaminación causada

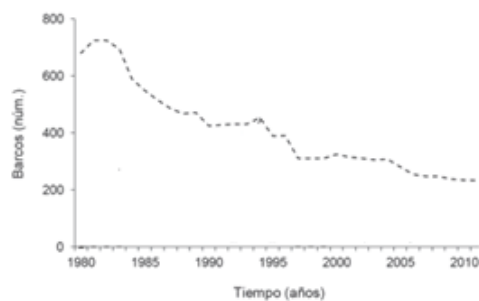


Fig. 2. Número de embarcaciones camaroneras registradas en Campeche de 1980 a 2011 [3, p. 78].

por la explotación de petróleo (Fig 4), las condiciones del ecosistema, el cambio ambiental, la modificación de áreas de crianza del camarón debido a la urbanización, la reducción de la flota, la sobrepesca de crecimiento y reclutamiento, entre otros [3, p.73]. Sin embargo, la hipótesis más válida apunta a la sobreexplotación de este recurso por parte de los pescadores tanto en la región marina como en las aguas costeras. Como consecuencia de la disminución de la población camaronera y el efecto negativo que trae tanto para la pesca como para la economía, el gobierno mexicano ha buscado diversas soluciones para reducir el impacto. Estas soluciones incluyen las restricciones en el uso de artes de pesca, la creación de las vedas, que son los periodos en los que se restringe la pesca de ciertas especies [5]; el Plan de manejo pesquero de camarón rosado de la sonda de Campeche y del camarón siete barbas en las costas de los estados de Campeche y Tabasco [6].

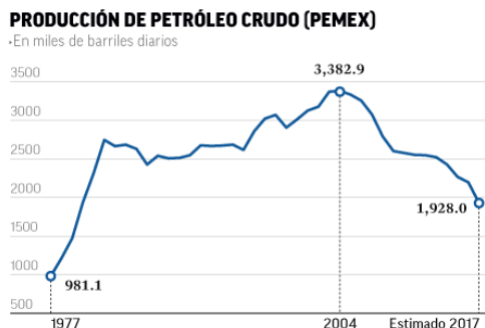


Fig. 3. Explotación de petróleo en México. [9]

La pesquería de camarón en Campeche es un problema que se ha decidido estudiar con dinámica de sistemas porque esta nos permite a diferencia de otras metodologías, realizar un análisis detallado del sistema en el tiempo, de los factores que le aportan y lo afectan para poder así establecer sus relaciones estructurales y comprender las causas profundas que provocan su comportamiento y evolución en un periodo de tiempo determinado [7]. Además, también es un sistema que tiene ciclos importantes de realimentación tanto negativos como positivos (balance y refuerzo), por lo que cada resultado del sistema lo equilibra o lo modifica, siendo la dinámica de sistemas la mejor herramienta para establecer

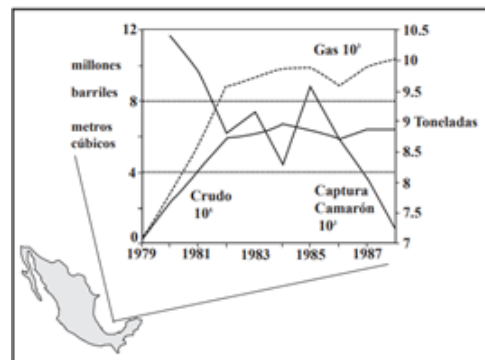


Fig. 4. Captura anual de camarón, producción de petróleo crudo y gas natural en Campeche durante 1980 [4, p. 402]

y estudiar cada uno de estos ciclos y su importancia en el sistema y/o problema.

IV. HORIZONTE DE TIEMPO

Así, debido a la importancia del tema, en este trabajo modelamos y simulamos mediante el uso de dinámica de sistemas el comportamiento de la población de camarones en Campeche desde 1965 a 2025, para así mostrar el comportamiento que tenía años antes del registro de captura máxima (efectuado en 1972) y desde allí mostrar la disminución de la población debido a los efectos de sobreexplotación, industria petrolera y número de embarcaciones pesqueras [3] y crear posibles escenarios de solución para el futuro y visualizar su comportamiento; lo que permite ver claramente cuando surgió el problema y el impacto de las diferentes políticas que han sido implementadas.

V. DIAGRAMA CAUSAL

El diagrama causal para la pesca de camarón en Campeche se puede observar en Anexo A. En este se pueden observar las causas y consecuencias derivadas del problema anteriormente propuesto. Para hacer un análisis y entendimiento más profundo de la estructura del sistema planteado, se procederá a explicar cada ciclo de realimentación.

- **B1 (Deterioro de barcos):** Este ciclo de balance permite controlar el número de barcos disponibles para la actividad pesquera. Y es que entre más deterioro o daño de barcos se produzcan, menos número de ellos habrá; del mismo modo, entre más número de barcos existen, más barcos deteriorados van a existir en un futuro.
- **B2 (Extracción de petróleo):** Luego, a más reservas de petróleo se dará lugar a más explotación del mismo debido al uso de este recurso por parte de los humanos; así mismo, a más explotación de reservas de petróleo, estas se irán disminuyendo debido al consumo, formando un ciclo de balance.
- **B3 (Pesca de camarones):** Es claro que a más población de camarones se dará una mayor pesca de los mismos debido a las necesidades humanas; así mismo si se da una mayor pesca se reduce la población de camarones.
- **B4 (Muerte de camarones):** A más muerte de camarones, se disminuirá su población y así mismo, entre

mayor sea la población de camarones, se dará una mayor muerte de estos por causas diversas distintas a la pesca.

- B5 (Adquisición de barcos): A una mayor compra de barcos por las necesidades de la pesca, claramente se tendrá un mayor número de barcos disponibles para realizar dicha pesca; así mismo, a mayor número de barcos disponibles se tendrá una menor diferencia entre los barcos necesarios para capturar los camarones deseados y los barcos que se tienen actualmente.
- B6 (Crecimiento de la industrialización): Sabemos que entre mayor sea la pesca entonces menor será la tasa de industrialización debido a que no faltará mucho para alcanzar el nivel deseado de pesca, así mismo entre mayor sea la tasa de industrialización entonces mayor será el desarrollo de la misma, y por ende a mayor desarrollo claramente mayor será la industrialización. En consecuencia, si existe una mayor industrialización, entonces mayor será la cantidad de toneladas de camarón que podrá capturar cada barco y así, si existe mayor capacidad de pesca por barco entonces mayor será la capacidad total de pesca, lo que conlleva a que se dé una mayor pesca de camarones.
- R1 (Nacimiento de camarones): Si existe un mayor número de camarones, se darán más nacimientos de los mismos, debido a que se dará un mayor coito animal. Igualmente, si se dan más nacimientos de camarones es evidente que la población aumentará.
- R2 (Pesca vs. número de barcos): A más toneladas de camarón pescadas, se darán unos mayores costos de la pesca. Así mismo, si estos costos aumentan, el precio de la tonelada de camarón también lo hará y si aumenta dicho precio, las empresas y pescadores querrán pescar más, para obtener más ganancias. Si la pesca deseada para generar más ganancias aumenta, entonces el número de barcos necesarios para efectuar la pesca también aumenta. Si requiero de un mayor número de barcos, entonces se dará una mayor diferencia entre los barcos actuales y los barcos necesarios. Entre mayor sea dicha diferencia, mayor número de barcos se necesitan comprar para cubrir dicho deseo de pesca y si se da una mayor compra, claramente el número de barcos actuales aumentará, así mismo, a mayor número de barcos se podrá ejecutar o se tendrá una mayor capacidad pesquera y finalmente, si la capacidad de pesca total aumenta, también lo hará la pesca de camarones.
- R3 (Impacto en la población camarонера): A más explotación de petróleo se dará más contaminación, en este caso específico marítima, debido a posibles derrames de sustancias que disminuyen la cantidad de oxígeno dentro del agua, lo que puede ocasionar que muchos organismos mueran, desestabilizando a largo plazo el ecosistema [8]. Así, a mayor contaminación del agua se darán más muertes de camarones; a más muertes de camarones se disminuye la población de los mismos y así, a más presencia de camarones en las aguas, se dará una mayor pesca para el consumo

humano. Luego, si se da una mayor pesca, entonces se disminuirá la tasa de industrialización debido a que cada vez se acerca al nivel deseado, luego, si existe una mayor tasa de industrialización entonces claramente va a existir un mayor desarrollo de la misma lo que como consecuencia trae que haya más industrialización y por ende mayor explotación del petróleo.

- R4 (Impacto de la industrialización en el precio): En este ciclo vemos que a más industrialización más desarrollo habrá por ende, la capacidad pesquera de los barcos aumenta, haciendo que la capacidad total de pesca aumente también. Y entre más capacidad de pesca tenga, mayor será la pesca que se va a relizar. Como consecuencia de esto, el costo aumentará haciendo que el precio también lo haga. Entre más precio tengamos, más pesca se deseará, y entre más pesca se desee, más tasa de industrialización lo que llevará a un mayor desarrollo de la industrialización y por ende, la industrialización aumentará.
- R5 (Industrialización vs. Número de barcos): En este importante ciclo se observa que entre más crezca la industrialización y sus factores, mayor será el número de barcos. Así, a más pesca haya, menor será la tasa de industrialización; entre mayor tasa, mayor desarrollo de la industrialización y así mayor industrialización. Ahora, entre más industrialización, más capacidad tendrán los barcos para pescar haciendo que los barcos necesarios disminuyan. Entre más barcos necesarios, más diferencia habrá entre los barcos actuales y los necesarios y entre más diferencia, mayor será la compra haciendo que el número de barcos actuales aumente. Y si aumenta el número de barcos, aumentará la capacidad total de pesca y como consecuencia, la pesca crecerá.

Finalmente es importante explicar algunas variables que pueden resultar ambiguas.

- Capacidad total pesca: Esta variable nos indica la capacidad total de pesca que se tiene, de acuerdo a la capacidad de pesca que tiene cada barco y al número de barcos con los que se cuenta para la pesca en el momento. Ya que claramente, no se podrá pescar más de la capacidad total que se tenga.
- Industrialización: Se refiere al desarrollo de la industria, es decir la producción de bienes y servicios a gran escala, claramente esto se relaciona con la cantidad de empresas o fábricas.
- Pesca deseada: Esta variable puede generar cierta confusión, pero como se explicó anteriormente, se refiere a la cantidad de camarones pescados que se anhelan por parte de pescadores e industrias, para así evitar una escasez del producto, evitar una sobrepoblación del mismo y a la vez obtener ganancias.

VI. DIAGRAMA DE FLUJOS Y NIVELES

El diagrama de flujos y niveles para el problema de la pesca del camarón en Campeche se encuentra en el Anexo

A, en el cual se evidencia el modelado del factor central del problema, la población de camarones, y la manera en que se ve afectada o beneficiada por diversos factores como la explotación de petróleo, el número de barcos pesqueros y la industrialización.

A. Supuestos, entradas y salidas

- **Supuestos:** Algunas variables o parámetros que supusimos según nuestra intuición o el comportamiento de años anteriores, fueron:

- Tasa de nacimiento: Supusimos una tasa de nacimiento de 0.668, ya que no fue posible encontrar este valor exacto en la bibliografía consultada. Sin embargo, encontramos que una sola hembra pone aproximadamente 15000 huevos [10], lo que nos indica que los nacimientos son muy altos. Además, esta tasa debe ser mucho mayor a la de mortalidad para evitar la extinción de la especie. Por otro lado, haciendo las pruebas del modelo, encontramos que este valor era el más adecuado para ajustar la población lo más similar posible a los datos históricos que teníamos.
- Contaminación por barril: Este fue un valor complicado de encontrar. Sabíamos que la explotación del petróleo se iba a dar en cantidades exorbitantes, pero eso no significaba que por cada barril explotado se contaminara un metro cúbico de agua. La contaminación de agua se puede dar por un posible derrame de crudo o por la misma explotación dentro del mar que es lo que sucede en el Complejo Cantarell. Así, definimos entonces que la contaminación del agua a causa de la explotación podría oscilar entre los 6 mil o 10 mil metros cúbicos aproximadamente, de esta manera logramos ajustar este valor a 0.0000125.
- Tasa de compra: Luego de varias pruebas y valores dados, encontramos que el valor supuesto que más se ajustaba al propósito del modelo era una tasa de compra de 0.28. Y esto debido a que sabíamos no se podía efectuar toda la compra necesaria ya que posiblemente en los siguientes años se iba a pescar una menor cantidad de camarones, lo cual representaría una pérdida.

- **Entradas:** Para nuestro modelo tendremos como datos y condiciones iniciales las siguientes:

- Población de camarones: Partiendo desde el año 1965 y teniendo en cuenta la pesca promedio de camarón (Fig 1), estimamos una condición inicial para la población de 32000 toneladas de camarón.
- Número de barcos: Según la investigación realizada y datos obtenidos, para el número de barcos desde 1965, se tiene una condición inicial aproximada de 430[3].
- Reservas de petróleo : Gracias a las fuentes leídas y consultadas, se establece para las reservas de petróleo en el año 1965 una condición de 40 mil

millones de reservas[11], ya que estas son las encontradas en el Complejo Cantarell ubicado en Campeche. Se puede asumir que dichas reservas estaban desde 1965 en el territorio, sólo que su descubrimiento y explotación se dio años después.

- Industrialización: Esta variable nos indica un factor de aumento en la industrialización, por ende su valor inicial será de 1, que será donde la industrialización se encuentra en un valor normal.
- **Salidas:** Las principales variables a estudiar en nuestro modelo son:
 - Pesca: La pesca es uno de los flujos de salida de nuestro modelo el cual estudiaremos más profundamente. Es bastante fundamental porque afecta de manera crucial variables significativas del modelo como lo son la sobreexplotación y los costos, las cuales a su vez también afectan otras variables que influyen considerablemente en el comportamiento del sistema. Así mismo, es una de las variables de las que queremos evidenciar su comportamiento, ya que esto nos dice la relación que tiene la pesca con la población de camarones. Se espera un comportamiento que llegue a un valor máximo esperado aproximadamente en el año 1972 y de allí empiece a descender hasta acercarse mucho a 0.
 - Explotación de petróleo: Este también es un flujo de salida de nuestro modelo, el cual es bastante relevante a la hora de estudiar las causas de mortalidad de camarones y cómo el impacto del medio ambiente es una de las causas significativas para la disminución en la población. Se espera un comportamiento que llegue a su valor máximo alrededor de los años 90 y 2000, que fue donde se dio el auge de explotación de petróleo en esta zona de México y de allí empiece a descender debido a que como el petróleo es un recurso finito, no se podrá seguir explotando en cantidades tan grandes, debido a su escasez.
 - Número de barcos: El número de barcos es una variable fundamental dentro de nuestro modelo, ya que esta influye directamente en la capacidad total de pesca que a la vez afecta a la pesca, por ende es importante para nosotros evidenciar su comportamiento en el tiempo. Se espera que en un inicio los barcos suban debido al auge de la actividad pesquera, pero luego de determinado año su tendencia sea a disminuir debido a que se realizará menos compra de estos ya que la pesca de camarón no tendrá mucho auge y también por el deterioro de los barcos que se va dando con el paso de los años.

B. Unidades

Cabe aclarar que para conservar la consistencia dimensional de cada una de las unidades, se hizo necesario agregar en algunos casos variables auxiliares. Las unidades de cada uno de los factores descritos en el diagrama se dan

a continuación.

- Nacimiento: Toneladas de camarones/año
- Tasa de nacimiento: 1/año
- Población de camarones: Toneladas de camarones
- Mortalidad: Toneladas de camarones/año
- Tasa de mortalidad: 1/año
- Aux1: Toneladas de camarones/metro cúbico
- Pesca: Toneladas de camarones/ año
- Población máxima: Toneladas de camarones
- Creación de vedas: Tiempo de veda/año
- Sobreexplotación: Toneladas de camarones/año
- Pesca ideal: Toneladas de camarones/año
- Tasa ideal: 1/año
- Costos: \$/year
- Costo tonelada: \$/Toneladas de camarones
- Precio venta Tonelada camarón: \$/Toneladas de camarones
- Oferta mínima esperada: Toneladas de camarones
- Aux2: año
- Pesca deseada: Toneladas de camarones/año
- Barcos necesarios: Barcos
- Diferencia: Barcos
- Compra: Barcos/año
- Tasa de compra: 1/año
- Número de barcos: Barcos
- Deterioro: Barcos/año
- Vida útil: año
- Capacidad total de pesca: Toneladas de camarones/año
- Capacidad pesquera: Toneladas de camarones/(Barcos*año)
- Capacidad usual: Toneladas de camarones/(Barcos*año)
- Industrialización: 1 (Adimensional)
- Desarrollo industrialización: 1 (Adimensional)
- Tasa de industrialización: 1 (Adimensional)
- Explotación: Barriles/año
- Reservas de petróleo: Barriles
- Tasa de explotación: 1/año
- Contaminación de agua: metro cúbico/año
- Contaminación por barril: metro cúbico/barriles

C. Ecuaciones

Obtuvimos las siguientes ecuaciones, condiciones iniciales de los niveles y valores de los parámetros para nuestro modelo.

• Niveles

- POBLACIÓN DE CAMARONES:
 $\frac{dP}{dt} = \text{Nacimiento} - \text{Pesca} - \text{Mortalidad}$
 $P(1965) = 32000$ toneladas de camarones (Supuesto al observar el comportamiento de la pesca (Fig.1))
- NÚMERO DE BARCOS:
 $\frac{dB}{dt} = \text{Compra} - \text{deterioro}$
 $B(1965) = 430$ barcos (basado de [3])
- RESERVAS DE PETRÓLEO: $\frac{dR}{dt} = -\text{Explotación}$
 $R(1965) = 40000000000$ barriles [11]
- INDUSTRIALIZACIÓN:

$$\frac{dI}{dt} = \text{Desarrollo Industrialización}$$

$$I(1965) = 1$$

• Parámetros

- TASA DE NACIMIENTO: 0.668 (basado en pruebas e información sobre la reproducción del camarón obtenida de [10])
- TASA DE MORTALIDAD: 0.25 [12]
- TASA DE EXPLOTACIÓN: 0.011279 (Promedio de [13])
- CONTAMINACIÓN POR BARRIL: 1.25×10^{-5} (Supuesto)
- POBLACIÓN MÁXIMA: 38000 (Obtenido al observar el comportamiento de pesca (Fig.1))
- CAPACIDAD USUAL: 30 [14]
- VIDA ÚTIL: 30 [15]
- TASA DE COMPRA: 0.28 (Luego de varias pruebas, llegamos a la conclusión que según las ganancias y la variación de la pesca era el valor más adecuado)
- TASA IDEAL DE PESCA: 0.5 (Teniendo en cuenta la población, nacimiento, muertes y pesca llegamos a este valor)
- COSTO TONELADA: 5650 [16]
- OFERTA MÍNIMA ESPERADA: 10000 (Basado en la pesca (Fig.1))
- AUX1: 0.01 (Al observar el comportamiento de mortalidad y evitar que las muertes fueran mayores a los nacimientos)
- AUX2: 1 (Es de ayuda para conservar la consistencia dimensional)

• Flujos y variables

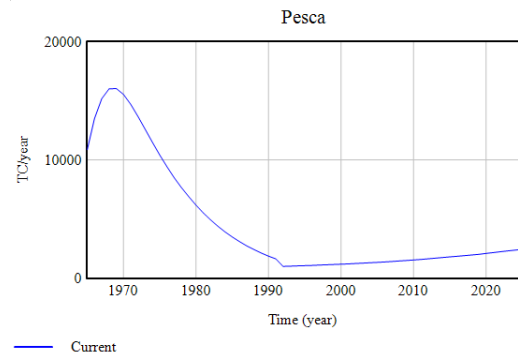
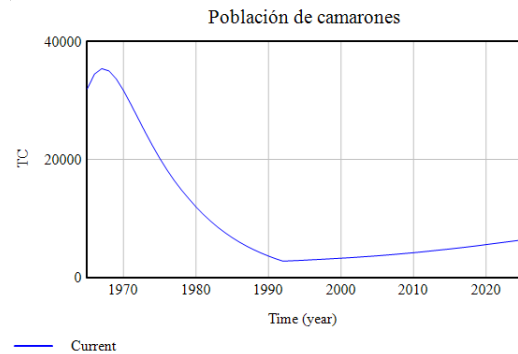
- NACIMIENTO: Población de camarones*Tasa de nacimiento [17]
- MORTALIDAD: IF THEN ELSE(Time<1979,Población de camarones*Tasa mortalidad,IF THEN ELSE(Población de camarones=0, Población de camarones*Tasa mortalidad,Población de camarones*Tasa mortalidad+(Contaminación de agua*Aux 1))) [17]
- EXPLOTACIÓN: IF THEN ELSE (Time<1979, 0, Reservas de petroleo*Industrialización*Tasa de explotación) [13]
- CONTAMINACIÓN DEL AGUA: Contaminación por barril* Explotación
 Teniendo en cuenta sólo la contaminación del agua a causa de la explotación de petróleo.
- PESCA: IF THEN ELSE (Creación de vedas=0,(Población de camarones/Población máxima)*Capacidad total, (Población de camarones/Población máxima)*Capacidad total*0.7) [18]
 Luego de varias pruebas, asumimos que si existía veda, entonces en dicho año se pescaría aproximadamente 70% de lo normal.
- SOBREEXPLOTACIÓN: IF THEN ELSE (Pesca

- > Pesca ideal, Pesca - Pesca ideal, 0)
- PESCA IDEAL: Población de camarones * Tasa ideal de pesca
- CREACIÓN DE VEDAS: IF THEN ELSE (Time > 1991, 0.5, 0) [14]
- COSTOS: Costo tonelada * Pesca
- PRECIO VENTA TONELADA DE CAMARÓN: $(Aux\ 2 * Costos * (100 / (100 - 30))) / Oferta\ minima\ esperada$ [19]
- PESCA DESEADA: Esta variable fue definida por medio de una función gráfica, como esta depende del precio de venta de la tonelada de camarón concluimos que sin importar los precios la pesca deseada siempre va a estar alrededor de las 20000 toneladas para evitar una extinción y una sobrepoblación de camarones que traería consigo un desbalance biológico.
- BARCOS NECESARIOS: Pesca deseada / Capacidad pesquera
- CAPACIDAD PESQUERA: Industrialización * Capacidad usual
- DIFERENCIA: IF THEN ELSE (Número de barcos > Barcos necesarios, 0, INTEGER (Barcos necesarios - Número de barcos))
- COMPRA: INTEGER (Diferencia * Tasa de compra)
- DETERIORO: INTEGER (Número de barcos / Vida útil)
- CAPACIDAD TOTAL: Capacidad pesquera * Número de barcos
- TASA INDUSTRIALIZACIÓN: IF THEN ELSE (Pesca < Pesca deseada, 0.033, 0)
Asumimos que si se hace necesario alcanzar una pesca deseada, entonces debe existir más industrialización para llegar a dicho valor, con un aumento aproximado del 3.3% cada año
- DESARROLLO INDUSTRIALIZACIÓN: IF THEN ELSE (Tasa Industrialización > 0, Industrialización * Tasa Industrialización, 0)

VII. RESULTADOS

A. Resultados de la simulación del caso base

Primeramente es importante recordar que, el propósito de nuestro modelo es presentar el comportamiento de la población de camarones en Campeche de 1965 a 2025 para entender las causas de su comportamiento. A continuación, presentamos las gráficas de las variables más importantes luego de la simulación del caso base:



De acuerdo a los resultados anteriormente mostrados, vemos que la población tiene un momento máximo en los primeros años y luego empieza a disminuir, esto debido a que para estos años se realizó la pesca máxima de camarones, lo que llevó a que la población disminuyera. Del mismo modo, en los primeros años se da la mayor pesca, por un lado, gracias a la gran cantidad de población que había, y por el otro gracias a que la capacidad total de pesca aumentó rápidamente gracias a los barcos que se tenían, y a su capacidad pesquera, además de que no existían vedas en dichos años.

Con respecto al número de barcos (Fig 8), en un principio se ve que aumentan, esto se debe a que su capacidad de pesca es la mínima debido a que la industrialización era baja y por tanto la compra aumentó, pero luego debido a la decadencia de la pesca la compra se redujo y el deterioro seguía. Y por el lado de la explotación (Fig.7), después de 1979, se produce a gran escala sin disminuir hasta aproximadamente el año 2005, debido a la escasez y fluctuación del precio de este recurso.

Vemos entonces que, cada uno de los factores explicados anteriormente son los que tienen más influencia en el comportamiento de la población. Lo que nos permite entonces evidenciar que la dinámica de la población no es sólo afectada por la pesca como se piensa, sino que es afectada directa o indirectamente por otros factores fundamentales que si disminuyen esta lo hace o viceversa.

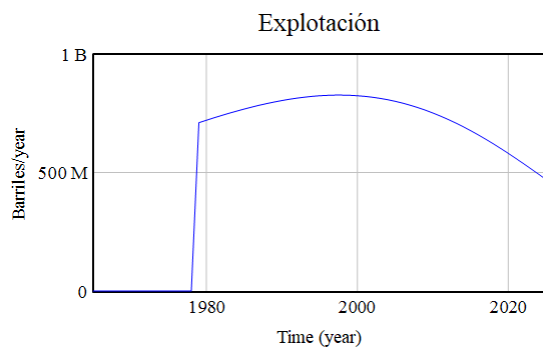


Fig. 7. Explotación de petróleo - caso base.

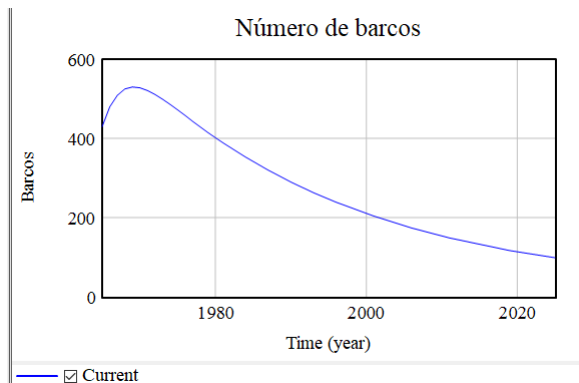


Fig. 8. Número de barcos - caso base.

B. Pruebas de validación

• Validación de estructura:

- Prueba teórica de la estructura del modelo: En esta validación de nuestro modelo verificamos que todas las ecuaciones presentadas anteriormente estuvieran bien escritas, sin ningún error de sintaxis. Como resultado obtuvimos "Ecuaciones ok" y comportamientos adecuados de todos los niveles, flujos, variables y parámetros por parte de Vensim.
- Consistencia dimensional: Esta prueba no solo la realizamos al tener el modelo terminado, sino también a lo largo de su elaboración. Esta validación fue importante para poder así explicar de manera correcta el significado de cada nivel, flujo o variable según el caso; como resultado obtuvimos "Unidades ok" en todas las ecuaciones.
- Prueba teórica de verificación de parámetros: Como se pudo ver en la sección anterior de las ecuaciones del modelo, la mayoría de parámetros son basados en referencias bibliográficas, así mismo, para algunos otros no fue posible encontrar de manera exacta su valor, pero de acuerdo al comportamiento histórico presentado encontramos un valor aproximado. Así, todos los parámetros son consistentes de acuerdo a bases bibliográficas.

• Validación de comportamiento orientada a estructura:

- Condiciones extremas: En esta prueba de validación lo que hicimos fue verificar que las simulaciones eran consistentes bajo valores extremos. En primer lugar, hicimos 0 el valor inicial de la población de camarones ($P(0) = 0$), lo que obtuvimos fue que todo sería cero (Fig 9), tanto la pesca, como la mortalidad, los barcos, gracias a que todo depende de la población. Sin embargo, no se detectaron errores, las simulaciones fueron consistentes.

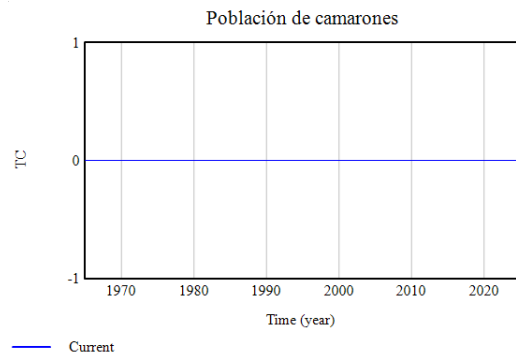


Fig. 9. Resultado condiciones extremas en la población.

Por otro lado, le dimos un valor de 32000000000 a la población inicial (Fig 10), lo que observamos fue que esta tendía cada vez a valores más altos, sin hacer que la simulación tuviera errores o que fuera inconsistente.

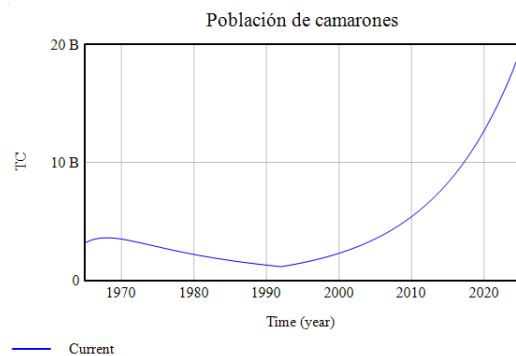


Fig. 10. Resultado condiciones extremas en la población.

Luego, hicimos nula la condición inicial de las reservas de petróleo, observamos así que no va a existir explotación de petróleo y por ende, tampoco va a existir contaminación del agua a causa de la explotación de petróleo, mostrando una disminución en la mortalidad de camarones con respecto al caso base. Esto lo que permite evidenciar es que la población va a tender a recuperarse mucho más rápido sin acercarse a su extinción (un valor de 0),

el cual es un comportamiento lógico y adecuado para el modelo (Fig. 11). A este nivel no le dimos un valor extremo alto ya que de por sí en el caso base la condición inicial de las reservas es bastante grande.

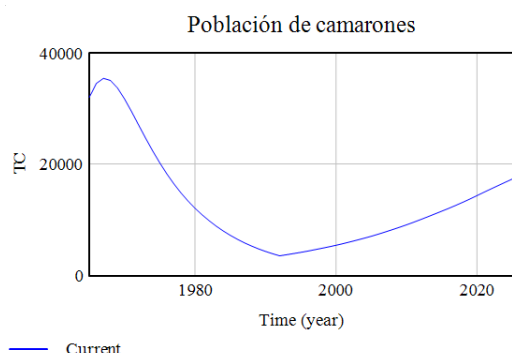


Fig. 11. Resultado condiciones extremas en las reservas de petróleo.

- Cambio en el horizonte de tiempo: Extendiendo el horizonte de tiempo hasta el año 2100 (Fig.12) se ve un comportamiento adecuado, en un inicio la población tiende a disminuir hasta acercarse a 0 y luego a causa de la creación de vedas que se dan desde el año 1992 la población tiende a recuperarse un poco, pero debido a la pesca intensiva nuevamente a mediados del año 2070 al 2080 la población decae demasiado hasta el punto que le es imposible recuperarse y por ende, para el año 2100, verificando la tabla de valores de simulación que arroja Vensim, encontramos que el valor de la población para dicho año es de 3.26×10^{-5} , lo que nos muestra que la población ya estaría a punto de la extinción.

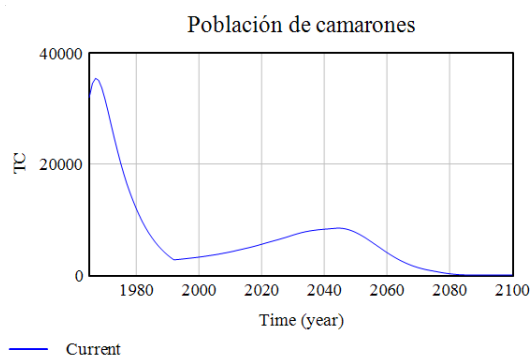


Fig. 12. Resultado extensión del horizonte de tiempo hasta el año 2100.

- Cambio en el tamaño de paso: Por otro lado, realizamos la validación cambiando el tamaño de paso de simulación y cambiando el método de integración. A continuación se muestran los resultados.

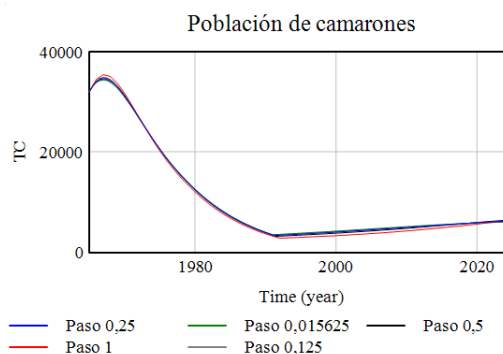


Fig. 13. Resultado con diferentes tamaños de paso.

Observamos así que en diferentes tamaños de paso a través del método de integración de Euler el modelo se comporta igual, por ende podemos concluir que el método es robusto para este tipo de modelo. Adicionalmente, al cambiar el método de integración por RK4 el modelo presenta un error debido a los valores tan grandes de explotación de petróleo, así concluimos que el método de integración RK4 es muy complejo para el modelo y por ende recomendamos el método de Euler que no implica tanta complejidad.

- Análisis de sensibilidad: Así mismo, luego de varias pruebas y simulaciones encontramos que el modelo es muy sensible a algunos parámetros, como la tasa de nacimiento y la tasa de compra de barcos, por ende, llegamos a la conclusión de que la tasa de nacimiento varía entre 0.65 y 0.68, ya que si se le da un valor más alto la población crecerá muy rápido y si es más bajo la población decae rápidamente, encontramos así un valor óptimo de 0.668. Por otro lado, la compra de barcos varía entre 0.26 y 0.32, ya que concluimos de que no se pueden comprar la totalidad de barcos necesarios porque en los siguientes años se podría pescar menos camarones o decaer la actividad económica lo cual generaría pérdidas, ni tampoco un porcentaje alto ni bajo, por tanto encontramos que el valor óptimo para este parámetro era de 0.28 para conservar la lógica del modelo.

• Validación del comportamiento:

- Replicación del comportamiento histórico: En toda la bibliografía consultada para este trabajo no fue posible encontrar los datos exactos de la pesca año tras año, por lo que no pudimos agregar ReferenceMode en Vensim, sin embargo en (Fig.1) se puede observar la pesca desde el año 1948 al año 1998, por lo tanto (Fig.14) muestra dicho comportamiento desde 1965 a 1998 y podemos observar un comportamiento parecido al real, ya que en un inicio la pesca aumenta hasta llegar a su punto máximo en un año cercano a 1972 y desde allí empieza a descender año tras año hasta llegar

a una captura por debajo de las 5000 toneladas de camarón.

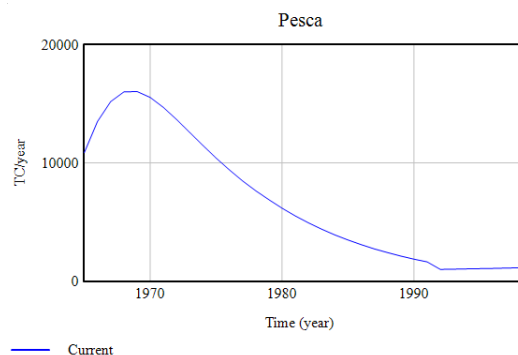


Fig. 14. Resultado pesca hasta 1998.

C. Políticas y/o escenarios

Realizamos 3 posibles escenarios, para así observar los diferentes comportamientos de la población de camarones. A continuación se presentan los resultados.

- **Escenario en el que no existen vedas.**

En la figura 15 se puede ver el comportamiento de la población de camarones en un escenario en donde la pesca no es restringida, es decir, en donde no hay vedas (periodos de restricción de pesca). Para crear este escenario, eliminamos la conexión que tenía las vedas con la pesca y modificamos la ecuación para que no se viera su influencia. Vemos entonces que, en

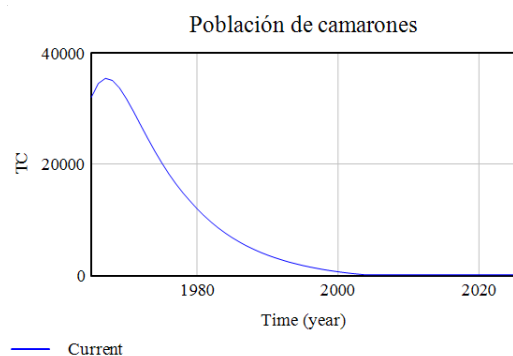


Fig. 15. Comportamiento de la población ante la ausencia de vedas.

un principio la población crece un poco, sin embargo, después decrece rápidamente haciendo que la población llegue prácticamente a su extinción. Lo que nos muestra este escenario es lo que hubiera pasado en realidad si el gobierno de México no hubiera impuesto ninguna medida ni solución, la población hubiera terminado en su extinción gracias a los altos niveles de pesca y a su mortalidad natural. Por lo que vemos entonces, la creación de vedas fue y ha sido efectiva para conservar la población de camarones como lo vemos en el caso base (Fig 5).

- **Explotación de petróleo no contamina el agua.**

En la figura 16 se puede observar el comportamiento

de la población creando un escenario en el que la explotación de petróleo no tuviera ningún efecto sobre la contaminación del agua. Para crear este escenario simplemente multiplicamos por 0 en la ecuación de la contaminación del agua, ya que en nuestro modelo sólo estamos considerando la contaminación a causa de la explotación de petróleo y en este escenario, como no existe, entonces será igual a 0 en todo el tiempo de simulación.

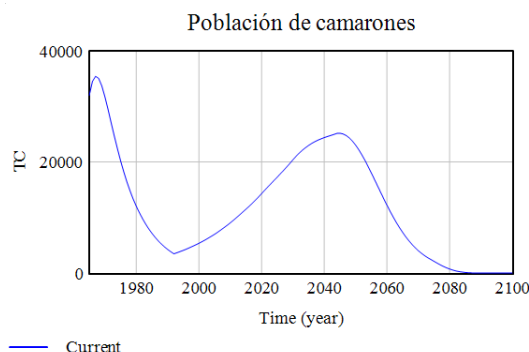


Fig. 16. Comportamiento de la población ante la ausencia de contaminación de agua a causa de la explotación de petróleo.

De esta manera, para observar un cambio realmente considerable en la población extendimos el horizonte de tiempo hasta el año 2100 y se puede observar que la población claramente decae en un principio por la pesca excesiva, pero con el paso del tiempo tiende a recuperarse mucho más, esta diferencia se puede observar con respecto a (Fig.12), y esto se debe a que como no existirá contaminación, entonces la mortalidad de camarones reducirá lo cual hace claramente que la población aumente a niveles más altos mucho más rápido.

- **Tasa de compra de los barcos se reduce a 0.15.**

En la figura 17 se puede observar el comportamiento de la población con una tasa de compra de los barcos menor a la tasa del caso base. Para realizar este escenario simplemente cambiamos el valor del parámetro de la tasa de compra.

En este escenario, podemos observar que la población de camarones no decae a niveles muy bajos y así mismo que tiende a recuperarse rápidamente. Esto se debe a que como la tasa de compra es tan baja, esto afectará al número de barcos y por ende a la capacidad total de pesca lo cual genera que la pesca sea mucho menor. Finalmente, si la pesca es menor esto permite que la población se recupere rápidamente.

X. ANEXOS

A. Anexo A: Diagramas

