

APLICACIÓN DE UN MODELO BIOECONÓMICO A LA PESQUERÍA DEL ERIZO ROJO, *Strongylocentrotus franciscanus*, DE LA COSTA NOROCCIDENTAL DE BAJA CALIFORNIA, MÉXICO

THE USE OF A BIOECONOMICAL MODEL IN THE FISHERY OF THE RED SEA URCHIN, *Strongylocentrotus franciscanus*, FROM THE NORTHWESTERN COAST OF BAJA CALIFORNIA, MEXICO

Yunuen Canedo-López¹
Michel Jules Dreyfus-León^{1,2*}
Alfredo Cota-Villavicencio²

¹ Facultad de Ciencias Marinas
Universidad Autónoma de Baja California
Apartado postal 453
Ensenada, CP 22800, Baja California, México

² Centro Regional de Investigaciones Pesqueras de El Sauzal
Km. 97.5 Carretera Tijuana-Ensenada
Ensenada, Baja California, México
* E-mail: dreyfus@cicese.mx

Recibido en octubre de 1998; aceptado en mayo de 1999

RESUMEN

La pesquería del erizo rojo, *Strongylocentrotus franciscanus*, recurso importante de Baja California, ha dado muestras de sobreexplotación. Se aplicaron los modelos de rendimiento por recluta y de optimización dinámica de Beverton y Holt para encontrar la talla de primera captura que permite optimizar ganancias y tratar de asegurar la permanencia del recurso para futuras generaciones. Los parámetros biológicos usados fueron $L_{\infty} = 155$ mm, $K = 0.22$ y $M = 0.22$. El modelo de rendimiento por recluta sugiere que para maximizar los rendimientos es necesario incrementar la talla de primera captura a 105 mm y aplicar mortalidades por pesca cercanas a 0.65. El modelo de optimización dinámica indicó que la talla de captura óptima y la biomasa óptima disminuyen con el aumento de la tasa de descuento, lo que se refleja en una disminución de los rendimientos. Para tasas de descuento menores que 5%, que se recomiendan para esta pesquería, la talla óptima de captura está comprendida entre los 110 y 116 mm. Ambos modelos sugieren que la talla mínima legal establecida por la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) de 80 mm para el erizo rojo está por debajo de la talla que permite optimizar las ganancias. Para lograr mayores capturas a largo plazo y maximizar el beneficio económico, es necesario incrementar la talla de primera captura a 110 mm. Para el caso de la tasa de descuento de 0% se calculó el intervalo de tiempo en el cual la pesca se efectúa a una tasa máxima. Los resultados indicaron que la temporada de pesca puede ser reducida de ocho a cuatro meses.

Palabras clave: *Strongylocentrotus franciscanus*, modelo bioeconómico, pesquería, erizo, sustentabilidad.

ABSTRACT

The commercial fishery of the red sea urchin, *Strongylocentrotus franciscanus*, an important resource in Baja California, is showing signs of overexploitation. The yield per recruit and the Beverton and Holt optimization dynamic models were used to find the size at first capture that allows maximum profits and keeps the resource at a sustainable level for future generations. The biological parameters used were $L_{\infty} = 155$ mm, $K = 0.22$ and $M = 0.22$. The yield per recruit model suggests that to maximize yield it is necessary to increase the size of first capture to 105 mm with fishing mortality close to 0.65. The results of the dynamic optimization model indicated that the size of optimum catch and cohort biomass decrease as the discount rate increases, and this is reflected in a reduction of the yields. For discount rates lower than 5%, which is recommended for this fishery, the size of optimum catch is located between 110 and 116 mm. Both models suggest that the minimum legal size established by the Ministry of Natural Resources, Environment and Fishing (SEMARNAP) of 80 mm for the red sea urchin is below the size that allows obtaining optimal gains. In order to obtain large catches in the long term and to maximize the economical profits it is necessary to increase the size of first capture to 110 mm. For the discount rate of 0% a time interval was calculated in which fishing takes place with a maximum rate. The results indicate that the fishing season can be reduced from eight to four months.

Key words: *Strongylocentrotus franciscanus*, bioeconomic model, fishery, sea urchin, sustainability.

INTRODUCCIÓN

El erizo de mar constituye un elemento muy importante de la comunidad bentónica, tanto numérica como funcionalmente, en la costa noroccidental de Baja California, además de ser la base de una pesquería comercialmente importante en la región (Ebert y Russell, 1992; Cota-Villavicencio *et al.*, 1997a).

La distribución geográfica del erizo rojo, *Strongylocentrotus franciscanus*, abarca desde Alaska hasta Isla de Cedros en Baja California, mientras que su distribución batimétrica es de 5 a 30 m de profundidad, aunque se ha reportado a profundidades hasta de 120 m. Habita en substratos rocosos, particularmente grietas y hendiduras, evitando limo y arena; se encuentra comúnmente asociado con los mantos de algas cafés como *Macrocystis pyrifera*, por ser esta alga su alimento preferido (Kato y Schroeter, 1985; Palleiro-Nayar *et al.*, 1988).

Tegner (1980) menciona a la competencia y la depredación como los factores más importantes que han controlado los patrones de distribución y abundancia del erizo rojo. Ramos-Mancilla (1985) concluye que dentro de las relaciones interespecíficas del erizo rojo en la zona de Jatay,

INTRODUCTION

The red sea urchin constitutes an important element of the benthic community, both numerically and functionally, along the northwestern coast of Baja California, besides supporting an important commercial fishery in the region (Ebert and Russell, 1992; Cota-Villavicencio *et al.*, 1997a).

The geographic distribution of the red sea urchin, *Strongylocentrotus franciscanus*, ranges from Alaska to Cedros Island in Baja California, while its bathymetric distribution changes from 5 to 30 m in depth, although it has been reported at a depth of 120 m. The red sea urchin inhabits rocky bottoms, particularly crevices and fissures, avoiding slime and sand; it is commonly found associated with the kelp beds of *Macrocystis pyrifera*, which is their preferred food (Kato and Schroeter, 1985; Palleiro-Nayar *et al.*, 1988).

Tegner (1980) mentions competition and predation as the most important factors that control the patterns of distribution and abundance of the red sea urchin. Ramos-Mancilla (1985) concludes that within the interspecific relationships of the red sea urchin in the area of Jatay,

Baja California, la depredación es la que juega el papel más importante debido a la ausencia en la zona de estudio de su principal competidor, el abulón.

Tegner y Dayton (1981) estudiaron la estructura de una población de erizos en términos de patrones de reclutamiento y mortalidad cerca de San Diego, California, y encontraron que el reclutamiento es anual. El patrón de distribución frecuencia-talla en presencia de depredadores naturales es bimodal, porque la mortalidad puede afectar las clases de tallas de manera diferente (Huston y De Angelis, 1987). Se ha observado que los juveniles (<40 mm) son protegidos por el efecto de “dosel” que dan las espinas de los adultos, los erizos de tamaño intermedio (50–80 mm) son muy vulnerables a la depredación y los adultos (>90 mm) obtienen un refugio parcial por su tamaño (Tegner y Levin, 1983).

La pesca comercial de algunos recursos bentónicos, como son el erizo morado (*Strongylocentrotus purpuratus*), el erizo rojo (*S. franciscanus*) y la langosta roja (*Panulirus interruptus*), ha alcanzado niveles bastante altos en su captura debido a la gran demanda que se tiene en el mercado internacional. En México, sólo en Baja California existe el erizo rojo que se explota comercialmente. Existen sólo dos especies que tienen importancia comercial: el erizo rojo y el erizo morado; de éstas, la primera se ha visto sometida a una mayor explotación, ya que alcanza el tamaño más grande entre las especies de erizo en el mundo y posee un alto rendimiento y calidad en sus gónadas (Kato, 1972; Palleiro-Nayar *et al.*, 1988; Cota-Villavicencio *et al.*, 1997a).

En lo que se refiere al contexto internacional, aproximadamente 50,000 t son capturadas anualmente en todo el mundo, y Japón domina la pesquería tanto en extracción para consumo local como en importación. En 1994, en el área comprendida por las islas Cook, EUA, y Baja California, México, se capturó el 19.65% de la captura total mundial (FAO, 1995).

Las capturas del erizo en Baja California presentan grandes fluctuaciones, con capturas máximas en los años de 1979 y 1986 (fig. 1)

Baja California, predation plays an important role due to the absence in the study area of the main competitor, the abalone.

Tegner and Dayton (1981) studied the population structure of the red sea urchin in terms of recruitment and mortality patterns at a site near San Diego, California, and found that recruitment is annual. The pattern of the size-frequency distributions in the presence of natural predators is bimodal, because mortality can affect the size classes in a different manner (Huston and De Angelis, 1997). It has been observed that juveniles (<40 mm) are protected by the spines of the adults, the red sea urchins of intermediate sizes (50–80 mm) are vulnerable to predation and the adults (>90 mm) obtain partial refuge because of their size (Tegner and Levin, 1983).

The commercial catches of some benthic resources, like the purple sea urchin (*Strongylocentrotus purpuratus*), the red sea urchin (*S. franciscanus*) and the red lobster (*Panulirus interruptus*), have reached high levels in their catches due to the big demand that they have in the market. Baja California is the only state in Mexico that commercially exploits the sea urchin. There are only two species with commercial value: the red sea urchin and the purple sea urchin; of these two, the first has been exploited intensively, since it reaches a size larger than the other sea urchin species in the world and has a gonad with a high yield and quality (Kato, 1972; Palleiro-Nayar *et al.*, 1988; Cota-Villavicencio *et al.*, 1997a).

In the international context, approximately 50,000 t are captured annually all over the world, and Japan controls the fishery in extraction for local consumption as well as in the magnitude of imports. In 1994, 19.65% of the world's catch was caught in the area between the Cook Islands, USA, and Baja California, Mexico (FAO, 1995).

The catches of the red sea urchin in Baja California present large fluctuations, with peaks in 1979 and 1986 (fig. 1) (Palleiro-Nayar *et al.*, 1991) as a consequence of a greater fishing effort

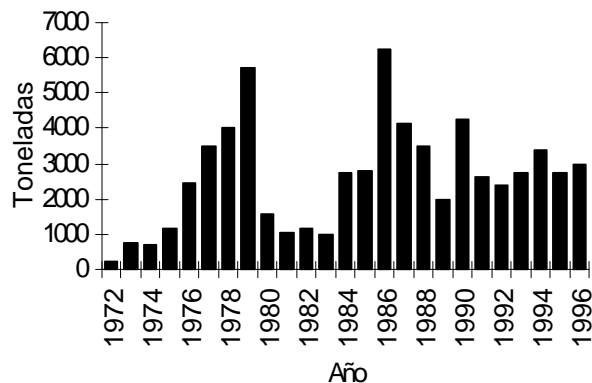


Figura 1. Captura anual de erizo rojo en la costa noroccidental de Baja California.
Figure 1. Annual catch of sea urchins from the northwestern coast of Baja California.

(Palleiro-Nayar *et al.*, 1991), esto como consecuencia de una mayor intensidad del esfuerzo pesquero y la incorporación de nuevas zonas de captura. Arredondo-Gómez (1994) indica que la alta producción de 1986 fue propiciada por un aumento en el número de permisos de pesca y por la nula reglamentación en la extracción del recurso, lo que acarrió una merma en las temporadas subsecuentes, dada la lenta recuperación del recurso. Los valores de CPUE a partir de 1987 comienzan a declinar debido al aumento en el número de equipos que operaron, lo que acarrió la sobreexplotación del recurso (Palleiro-Nayar *et al.*, 1991) (fig. 2).

La regulación del erizo rojo se inició en 1987 (Secretaría de Pesca, 1987). La época de veda que se aplica actualmente se publicó en 1993 y va del 1 de marzo al 30 de junio de cada año en las aguas de jurisdicción nacional de la costa oeste de Baja California; la talla mínima legal es de 80 mm (Anónimo, 1993, citado por Ramírez-Félix, 1997). Así mismo, se establecen cuotas de captura por zona y por temporada (Almanza-Heredia, 1997). A pesar de estas regulaciones, la pesquería de erizo no ha logrado recuperarse y los rendimientos tienden a disminuir.

El uso de modelos más complejos como los estructurales ha sido nulo por la escasa

and the finding of new fishing grounds. Arredondo-Gómez (1994) mentions that the high production of 1986 was propitiated by an increase in the number of fishing permits and by the absence of regulations in the exploitation of the resource. This brought a decrease in the subsequent seasons, given the slow recovery of the resource. Since 1987, CPUE started to decline due to the increase in the number of gears that operated (Palleiro-Nayar *et al.*, 1991) and this brought a depletion of the resource (fig. 2).

The fishery regulations of the red sea urchin started in 1987 (Secretaría de Pesca, 1987). The closed season currently in force was published in 1993 and lasts from 1 March to 30 June of each year on the coast of Baja California. The legal minimum size is 80 mm (Anonymous, 1983, cited in Ramírez-Félix, 1997) and fishing quotas by zone and season are established (Almanza-Heredia, 1997). In spite of these regulations, the sea urchin fishery has not been able to recuperate and the yields tend to decrease.

The use of more complex models, such as structural models, has been nonexistent because of the scant information regarding the ageing structure. Papers deal mostly with production models and models that use size distributions for management purposes. Some studies, like that of

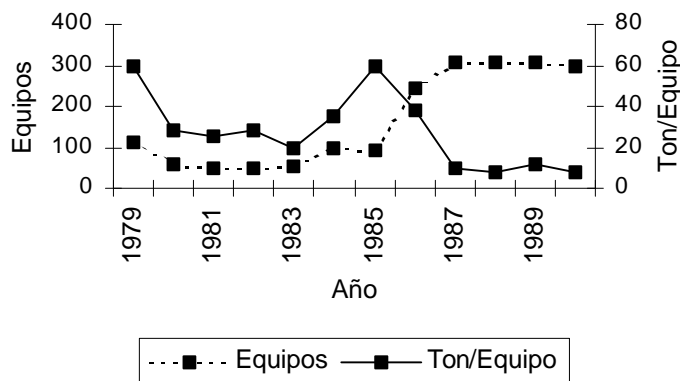


Figura 2. Esfuerzo y CPUE de erizo rojo en Baja California (tomado de Palleiro-Nayar *et al.*, 1991).
Figure 2. Effort and CPUE of the sea urchin fishery of Baja California (from Palleiro-Nayar *et al.*, 1991).

información que se tiene en cuanto a estructura por edades, limitándose los trabajos al manejo de los modelos de producción y de aquellos donde se incorporan tallas. Algunos trabajos, como el de Lelevier y Palleiro-Nayar (1987), emplean el método de análisis de cohortes estructurado por tallas para calcular las tasas de mortalidad total (Z), por pesca (F) y de explotación (E); sus resultados indican que la pesquería se encuentra sobre-explotada. Además, a través del modelo de rendimiento relativo, observaron que el rendimiento máximo sostenible se alcanza a una talla media de primera captura de 100 mm, manteniendo constante la F calculada.

Palleiro-Nayar *et al.* (1991) presentan los aspectos más relevantes de la pesquería, indicando que existe una fuerte presión de pesca sobre este recurso por el alto número de equipos de extracción que operan desde 1987. Además, por medio de muestreos de captura comercial en las plantas de 1984 a 1991, se observa una disminución en las tallas promedio de captura y, con muestreos de 1984 a 1987, trabajaron con el programa de computación ELEFAN y estiman la talla de reclutamiento a la pesquería, resultando ser de 75.50 mm de diámetro de caparazón.

Cota-Villavicencio *et al.* (1996) señalan que las cuatro zonas de pesca presentan altos niveles de esfuerzo de pesca, que se han venido

Lelevier and Palleiro-Nayar (1987), used the size frequency cohort analysis to estimate total mortality (Z), fishing mortality (F) and exploitation rates (E); their results indicate that the fishery is overexploited. In addition, with a relative yield model, they observed that the maximum sustainable yield would be reached at 100 mm size at first capture with a constant fishing mortality (F).

Palleiro-Nayar *et al.* (1991) presented the most relevant aspects of the fishery, indicating the existence of a strong fishing pressure due to the great number of fishing units that have been in operation since 1987. In addition, through samplings of commercial catches in the processing plants from 1984 to 1991, a diminution of the mean catch sizes was observed and, with samplings from 1984 to 1987, the same authors worked with the ELEFAN computer program to estimate a 75.508-mm recruitment size to the fishery.

Cota-Villavicencio *et al.* (1996), in an analysis of the commercial catches of the red sea urchin, found that the four fishing zones present high levels of fishing effort, which have been increasing annually because lower catches are obtained.

Cota-Villavicencio *et al.* (1997a) estimated the abundance and fishing mortality of the red and

incrementando anualmente con la obtención de bajas capturas.

Cota-Villavicencio *et al.* (1997a) estiman la abundancia y mortalidad por pesca del erizo rojo y del erizo morado que se explotan en las costas de Baja California y encontraron que para el erizo rojo, la zona II es la que presenta la mayor abundancia y la zona I la menor abundancia en la temporada 1996/1997.

Ramírez-Félix (1997) aplica por primera vez a la pesquería del erizo rojo un modelo del tipo de Schaefer y de depensación crítica, simulando situaciones de riesgo tomadas de encuestas hechas a los involucrados directa e indirectamente en la pesquería de erizo rojo, que incluye información sobre pesca furtiva, cambios de zona al renovar permisos de extracción y variabilidad en la temperatura. En las simulaciones hechas con ambos modelos la biomasa disminuyó para el sistema de permisos, mientras que con el manejo bajo concesiones se mantiene a la alza a excepción de los años con temperaturas altas, por lo que concluyó que la mejor opción para preservar la especie es otorgarla en concesión.

No se han empleado en este tipo de pesquerías otros tipos de modelos basados en un criterio de costo-beneficio que permitan maximizar las ganancias y, sobre todo, que permitan determinar la talla más adecuada en relación con la maximización de las ganancias.

El presente trabajo lleva el objetivo de determinar la talla de primera captura que permita optimizar las ganancias en la pesquería, tomando en cuenta características biológicas y económicas y que aseguren una mejor administración del recurso.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de captura, para fines administrativos, se divide en cuatro zonas: zona I, de islotes Coronado a Punta Banda; zona II, de Punta Banda a Punta Colonet; zona III, de Punta Colonet a El Socorro; y zona IV, de El Socorro a Punta Escarpada (fig. 3).

purple sea urchins that have been exploited on the coast of Baja California and found that for the red sea urchin, zone II had the highest abundance, whereas zone I had the lowest abundance in the 1996/1997 season.

Ramírez-Félix (1997) used, for the first time, a Schaefer model and a critical depensation model in the red sea urchin fishery to simulate situations under risk mentioned in a series of reports collected from those involved directly or indirectly in the fishery (especially fishermen and scientists), which included information related to the furtive fishery, changes of zone with the renewal of fishing permits and the effects of a physical factor, the variability of temperature. During the simulations with both models, the biomass decreased for the permit system, whereas in the concession regime, it continued to rise except for years with high temperature. It was therefore concluded that the best option to preserve the species is to give it under a concession regime.

Other kinds of models with a cost-benefit criterion that allow a maximization of the benefits and, above all, the estimation of the most suitable size in relation to the maximization of the profits have not been used in this type of fishery.

The purpose of this paper is to estimate the size at first capture that allows the optimization of benefits in the fishery, taking into account biological and economical characteristics that will assure a better management of the resource.

STUDY AREA

The fishing area, for administrative purposes, is divided into four zones: Zone I, in the north from Coronado Islands to Punta Banda; Zone II, from Punta Banda to Punta Colonet; Zone III, from Punta Colonet to El Socorro and Zone IV, from El Socorro to Punta Escarpada in the south (fig. 3).

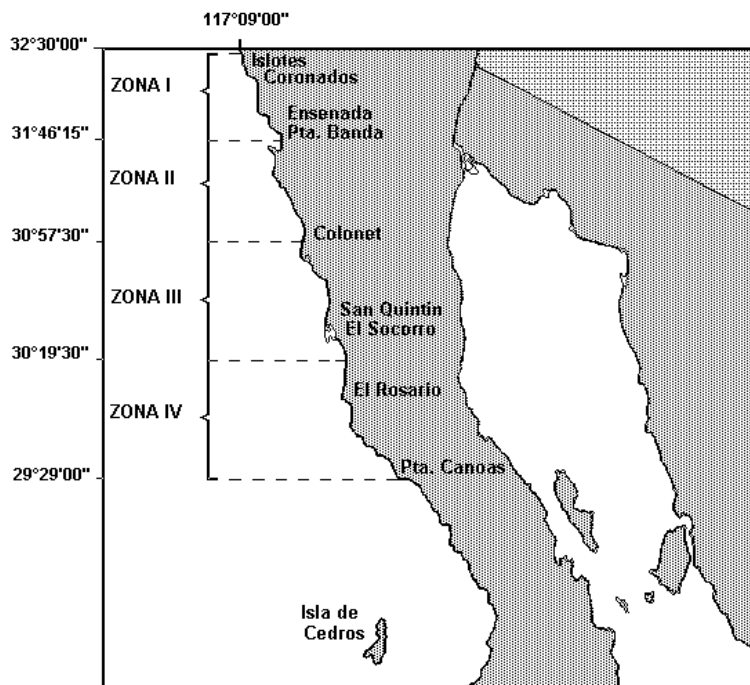


Figura 3. Localización de las zonas pesqueras para erizo rojo en Baja California (tomado de Pérez-Rodríguez, 1995).

Figure 3. Location of sea urchin fishing zones off Baja California (from Pérez-Rodríguez, 1995).

METODOLOGÍA

Modelo de rendimiento por recluta

Para apoyar el modelo bioeconómico, el cual se describe en la siguiente sección, y hacer algunas consideraciones en cuanto a la regulación de la pesquería, se aplicó el modelo de rendimiento por recluta descrito por Beverton y Holt (1964), con la siguiente fórmula:

$$Y' = E(1 - c) \frac{M}{K} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{U_n(1 - c)^n}{1 + \frac{nK}{M}(1 - E)} \quad (1)$$

donde $E = F/F + M$; $c = l_c/L_\infty$; Y' es el rendimiento por recluta; M , la tasa instantánea de

METHODS

Yield per recruit model

In order to support the bioeconomical model, which is described in the next section, and to consider the fishery regulations, the yield per recruit model described by Beverton and Holt (1964) was applied, with the following formula:

where $E = F/F + M$; $c = l_c/L_\infty$; Y' is the yield per recruit; M , the natural mortality rate; F , the

mortalidad natural; F , la tasa instantánea de mortalidad por pesca; E , la tasa de explotación; l_c , la talla de primera captura; L_∞ , la longitud asintótica promedio del organismo; K , el parámetro de la ecuación de crecimiento de von Bertalanffy; y U_n , una variable que toma los valores 1, -3, +3, -1 para $n = 0, 1, 2, 3$, respectivamente.

Los parámetros utilizados en este modelo fueron estimados en muestreos de la captura comercial de 1984 y 1985 por Lelevier y Palleiro-Nayar (1987): $L_\infty = 155$ mm, $K = 0.22$ y $M = 0.22$.

Con este modelo, se analizó el rendimiento correspondiente a la talla de reclutamiento de 80 mm y a las tasas de mortalidad por pesca estimadas por Cota-Villavicencio *et al.* (1997a) para las cuatro zonas de captura de erizo durante 1996. Así mismo, se estimó el rendimiento máximo que se puede alcanzar bajo esas mismas condiciones y en que medida se deben de modificar, ya sea la talla de reclutamiento o la F , para alcanzarlos.

Modelo de optimización dinámica

Se determinó la talla óptima de primera captura del erizo rojo partiendo de la curva de biomasa de una cohorte, según el modelo de optimización dinámica de Beverton y Holt descrito por Clark (1976), cuya fórmula es:

$$B = \frac{p^{-1} c \delta}{\delta + M - Dw(t)/w(t)} \quad (2)$$

donde B es la biomasa óptima; p , el precio de venta; δ , la tasa de descuento; c , el costo del esfuerzo de captura; M , la tasa instantánea de mortalidad natural; $w(t)$, el peso que alcanza el organismo a la edad t de acuerdo con la ecuación de von Bertalanffy (Ricker, 1975); y $Dw(t)$, la derivada del peso que alcanza el organismo.

La curva de peso se define como:

$$w(t) = W_\infty (1 - e^{-K(t-t_0)})^3 \quad (3)$$

$$Dw(t) = \frac{dw}{dt} = W_\infty 3K(1 - e^{-K(t-t_0)})^2 * e^{-K(t-t_0)} \quad (4)$$

fishing mortality rate; E , the exploitation rate; l_c , the size of first catch; L_∞ , the mean asymptotic length; K , the growth parameter of the von Bertalanffy equation; and U_n , a variable that takes the following values: 1, -3, +3, -1 for $n = 0, 1, 2, 3$, respectively.

The parameters used in this model were estimated from commercial catch samplings from 1984 and 1985 by Lelevier and Palleiro-Nayar (1997): $L_\infty = 155$ mm, $K = 0.22$ and $M = 0.22$.

With this model, the yields corresponding to the recruitment size of 80 mm and the fishing mortality rates estimated by Cota-Villavicencio *et al.* (1997) were analyzed, for the four fishing zones of sea urchin during 1996. The maximum yields were also estimated, under the same conditions, to show how either recruitment size or the F values must be modified to reach maximum yields.

Model of dynamic optimization

Optimum size of first catch for the red sea urchin was determined, starting from the biomass curve of a cohort, according to the Beverton and Holt dynamic optimization model described by Clark (1976), whose formula is:

where B is the optimum biomass; p , the sale price; δ , the discount rate; c , the cost of fishing effort; M , the natural mortality rate; $w(t)$, the weight the organism reaches at age t according to the von Bertalanffy equation (Ricker, 1975); and $Dw(t)$, the derivative of weight reached by the organism.

The weight curve is defined as:

Si la relación costo/precio es baja (e.g., si una gran proporción de la biomasa óptima de una cohorte tiene valor comercial), entonces la estrategia de pesca puede ser la de capturar a la mayor parte de la misma, justo antes de que alcance la edad t_δ , la cual puede ser deducida a partir de la ecuación:

$$\frac{Dw(t_\delta)}{w(t_\delta)} = M + \delta \quad (5)$$

Sustituyendo Dw y w , obtenemos:

If the cost/price ratio is low (e.g., if a high proportion of the optimum biomass of a cohort has commercial value), then the fishing strategy can be to capture the largest possible proportion of a cohort, just before they reach age t_δ , which can be deduced from the equation:

Substituting Dw and w , we obtain

$$\frac{W_\infty 3K(1 - e^{-K(t-t_0)})^2 (e^{-K(t-t_0)})}{W_\infty (1 - e^{-K(t-t_0)})^3} = M + \delta$$

Simplificando, factorizando y despejando, se obtiene:

Simplifying, factoring and finding a value, we obtain:

$$t_\delta = \frac{Kt_0 - \ln\left(\frac{M + \delta}{3K + M + \delta}\right)}{K} \quad (6)$$

Una vez calculada la edad óptima de captura mediante la ecuación 6, se graficó la curva de biomasa de una cohorte mediante la siguiente fórmula:

Once the optimum catch age is calculated with equation 6, the cohort biomass curve was calculated by means of the following formula:

$$B(t) = N(t) * w(t) \quad (7)$$

donde

where

$$N(t) = \begin{cases} Re^{-Mt} & \text{para/for } 0 < t < t_\delta \\ Re^{-Mt_\delta} e^{-(M+F)(t-t_\delta)} & \text{para/for } t \geq t_\delta \end{cases}$$

y R es el reclutamiento.

and R is recruitment.

Debido a que no se cuenta con estimaciones de reclutamiento de las costas de Baja California y a que éste es variable año con año, se manejó $R = 1$ y la biomasa resultante se normalizó con respecto a su valor máximo, denominándola biomasa relativa.

Due to the fact that no recruitment values are available from the coast of Baja California and it is variable from one year to the next, $R = 1$ was used and the resultant biomass was normalized with respect to the maximum value, calling it relative biomass.

Para el caso especial de $\delta = 0$, la pesca óptima se realiza capturando toda la biomasa aprovechable en el instante $t = t_0$. Esto implica maximizar el rendimiento aplicando una mortalidad por pesca infinita. Si F_{\max} es finita, hay un periodo $t_1 \leq t \leq t_2$, en el cual la pesca se efectúa a una tasa máxima $F = F_{\max}$. Para determinar el intervalo de pesca óptimo $[t_1, t_2]$, se utilizó la siguiente ecuación:

For the special case where $\delta = 0$, the optimum fishing is obtained by catching all the biomass available when $t = t_0$. This implies maximizing the yield by applying an infinite fishing mortality rate. If F_{\max} is finite, there is a period $t_1 < t < t_2$, during which fishing takes place under a high maximum rate $F = F_{\max}$. To determine the optimum fishing interval $[t_1, t_2]$, the following equation was used:

$$\int_{t_1}^{t_2} \varphi(t) dt = 0 \quad (8)$$

donde

where

$$\varphi(t) = e^{-(M + F_{\max})t} \left(\frac{dw}{dt} - Mw \right)$$

La ecuación 8 requiere que t_1 y t_2 sean elegidos en lados opuestos de t_0 , de tal manera que las áreas sean iguales. Así mismo, t_1 y t_2 deben satisfacer la siguiente ecuación:

Equation 8 requires that t_1 and t_2 be selected on both sides of t_0 , so that the areas are equal. Also, t_1 and t_2 must comply with the next equation:

$$e^{F_{\max}t_1} = \frac{C e^{(M + F_{\max})t_2}}{pRw(t_2)} \quad (9)$$

Se elaboró un programa computacional para estimar $t_2 > t_0$ y calcular t_1 usando la ecuación 9. Se calculó la integral I de la ecuación 8. Si I era positiva, implicaba que el valor de t_2 era muy pequeño, entonces se incrementaba t_2 con alguna cantidad dada y se repitió el procedimiento hasta lograr que I fuera menor que un valor de tolerancia muy cercano a cero.

A computer program was elaborated to calculate $t_2 > t_0$ and estimate t_1 using equation 9. The integral I was calculated from equation 8. If I was positive, this implied that the value of t_2 was very small, then t_2 was increased and the procedure was repeated until I was lower than a tolerance value very close to zero.

Para transformar las edades que resultan al aplicar las ecuaciones 6 y 8 a longitudes y así poder realizar un mejor análisis, se utilizó la ecuación general de von Bertalanffy:

To transform the age values that result from using equations 6 and 8 to length and make a better analysis, the general equation of von Bertalanffy was used:

$$L_t = L_{\infty}(1 - e^{-K(t-t_0)}) \quad (10)$$

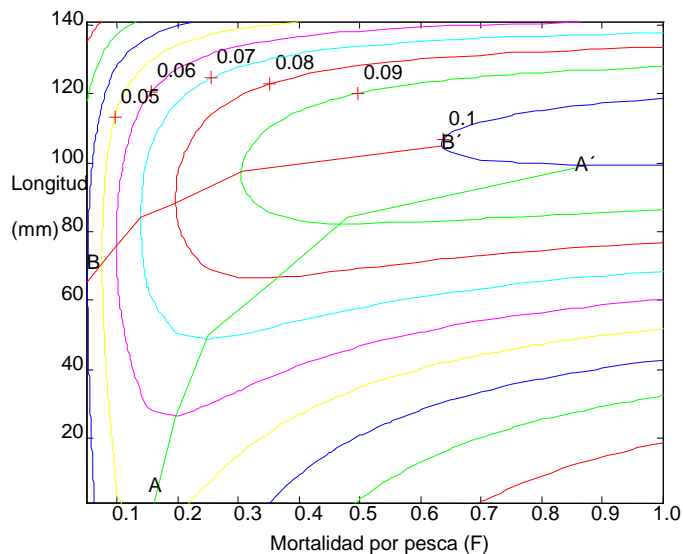


Figura 4. Diagrama de contornos de igual rendimiento para el erizo rojo.
Figure 4. Contour diagrams of equal yield for the red sea urchin.

Al igual que en el modelo de rendimiento por recluta (ecuación 1), los parámetros utilizados en esta ecuación son los estimados por Lelevier y Palleiro-Nayar (1987).

RESULTADOS

Modelo de rendimiento por recluta

En la figura 4 se presentan los contornos de rendimiento o isoplethas obtenidas para el erizo rojo con el modelo de rendimiento por recluta (ecuación 1). La situación de los mejores rendimientos para una talla dada de reclutamiento y para determinada mortalidad por pesca se representan con las trayectorias A-A' y B-B', respectivamente.

En la tabla 1 aparecen los rendimientos correspondientes al promedio anual de la mortalidad por pesca durante 1996, para las cuatro zonas de pesca, manteniendo una talla de reclutamiento de 80 mm.

As with the yield per recruit model (equation 1), the parameters used in this equation were those estimated by Lelevier and Palleiro-Nayar (1987).

RESULTS

Yield per recruit model

The yield contours or isopleths obtained for the red sea urchin with the yield per recruit model (equation 1) are presented in figure 4. The best yields for a given recruitment size and for a given fishing mortality are represented with the trajectories A-A' and B-B', respectively, in the same figure.

The yields corresponding to the annual mean of the mortality rate during 1996, for the four fishing zones, maintaining a recruitment size of 80 mm are given in table 1.

Regarding the maximum yields, according to this model, the following was obtained: the

Tabla 1. Rendimiento por recluta correspondiente a una talla de reclutamiento de 80 mm y al promedio anual de F durante 1996.

Table 1. Yield per recruit for a recruitment length of 80 mm and mean annual F for 1996.

Zona	Mortalidad por pesca durante 1996	Rendimiento
I	0.60	0.085
II	0.83	0.085
III	0.97	0.085
IV	0.98	0.085

En lo referente a los máximos rendimientos, de acuerdo con este modelo se obtuvo lo siguiente: el mayor rendimiento que se puede alcanzar para una talla media de captura de 80 mm es de 0.08, siempre y cuando se maneje un valor promedio anual de mortalidad por pesca (F) mayor que 0.4. En la zona I, el promedio de F resultó ser 0.60; a esta tasa de mortalidad corresponde un rendimiento máximo de 0.09 para una longitud de captura promedio de 105 mm. La zona II presentó una F promedio de 0.83, a la cual corresponde un rendimiento de 0.1 a una respectiva longitud de captura de 105 mm. En las zonas III y IV, las tasas de F fueron muy semejantes, de 0.97 y 0.98, respectivamente. El rendimiento máximo correspondiente es de 0.1 con una longitud de 105 mm. En la tabla 2 se resumen estos resultados.

Si se comparan los rendimientos "reales" con los rendimientos máximos esperados, manteniendo constantes los promedios de F durante 1996, se alcanza un incremento hasta de 10.5% en la zona I y hasta de 15% en las zonas II, III y IV, siempre y cuando se incremente la talla de captura a 105 mm de diámetro del caparazón. Por el contrario, si se mantiene constante la talla de captura en 80 mm, el máximo rendimiento que se puede alcanzar es de 0.08, aunque la mortalidad por pesca aumente hasta 1.

Modelo de optimización dinámica

El modelo bioeconómico se aplicó con tasas de descuento de 5%, 10%, 20%, 30% y 50%. Se

largest yield that can be reached for a mean catch size of 80 mm is 0.085, provided that a mean value of fishing mortality (F) higher than 0.4 is used. In zone I, the mean value of F is 0.60; a maximum yield of 0.095 for a mean catch size of 105 mm corresponds to this mortality rate. Zone II presented a mean F value of 0.839, corresponding to a yield of 0.1 with a catch size of 105 mm. In zones III and IV the F rates were similar, 0.97 and 0.988, respectively; the corresponding maximum yield is 0.1 with a length of 105 mm. The results are summarized in table 2.

If the "real" yields are compared with the expected maximum yields, maintaining constant the mean values of F during 1996, an increment is reached of up to 10.5% in zone I and 15% in zones II, III and IV, as long as the size of first catch is increased to 105 mm in length. On the contrary, if the size of first catch of 80 mm is held constant, the maximum yield that can be reached is 0.085, even if the fishing mortality is increased to 1.

Dynamic optimization model

The bioeconomic model was applied with discount rates of 5%, 10%, 20%, 30% and 50%. It was observed that with this model, the age or size of capture is independent of the cost/price ratio. According to this model, the size at first capture decreases as the discount rate increases. For a 0% discount rate the optimum size is 116 mm, whereas for a 50% value it is 74 mm; however,

Tabla 2. Resultados obtenidos por el modelo de rendimiento por recluta.

Table 2. Results from the yield per recruit model.

Zona de captura	F promedio en 1996	Máximo rendimiento	Talla de captura
Todas	0.4	0.085	80 mm
Zona I	0.6	0.095	105 mm
Zona II	0.84	0.1	105 mm
Zona III	0.97	0.1	105 mm
Zona IV	0.98	0.1	105 mm

observó que con este modelo la talla de captura es independiente de la relación costo/precio. De acuerdo con este modelo, la talla óptima de captura disminuye conforme aumenta la tasa de descuento. Para una tasa de descuento de 0% la talla óptima es de 116 mm, mientras que para una tasa de descuento de 50%, es de 74 mm; sin embargo, la tasa de descuento (δ) que se maneja comúnmente es cercana al 10%, a la cual le corresponde una talla de 104 mm. En pesquerías que tienen una función social y existe un gran interés en la preservación del recurso para futuras generaciones, se manejan tasas de descuento aún más bajas, de alrededor de 5% o incluso menores.

En la tabla 3 se presentan la edad y talla óptimas de captura de erizo correspondientes a diferentes tasas de descuento. Para tasas de descuento menores que 30%, la talla óptima es más alta que la talla mínima legal.

En la figura 5 se presenta la biomasa relativa de una cohorte de erizo rojo aplicando una F de 0.85 (promedio anual de 1994 de las cuatro zonas de captura) a partir de las edades óptimas de captura que se obtuvieron con el modelo bioeconómico para tasas de descuento de 0%, 25% y 50%.

En lo que respecta al intervalo de pesca óptimo, se calculó para una tasa de mortalidad por pesca de 0.4, por ser ésta la mortalidad mínima necesaria para alcanzar el máximo rendimiento con una longitud de 80 mm, según el modelo de rendimiento por recluta. El resultado fue iniciar la

the discount rate (δ) that is commonly used is close to 10%, corresponding to a size of 104 mm. In fisheries with a social function and the existence of a great interest in the preservation of the resource for future generations, the discount rates used are much lower, around 5% or even lower.

Age and optimum catch size of the sea urchin corresponding to different discount rates are shown in table 3. For discount rates lower than 30%, the optimum size is much higher than the mean legal size.

The relative biomass of a cohort is presented in figure 5 using an F value of 0.85 (the mean value of 1984 for the four zones) with the optimum catch ages that were obtained with the bio-economical model for discount rates of 0%, 25% and 50%.

With respect to the optimum fishing interval, a fishing mortality rate of 0.4 was used, this being the minimum mortality necessary to reach the maximum yield with a length of 80 mm, according to the yield per recruit model. The result was to initiate fishing at an age of 6.14 years or 115 mm and finish at 6.47 years or 118 mm, that is to say, the fishing period must last approximately 4 months.

The optimum fishing interval was estimated for a fishing mortality rate of 0.988 for zone IV, due to the fact that this mortality was the highest mean value in 1996 of the four zones. The model indicated that fishing must take place when the

Tabla 3. Edad y talla de captura óptimas para diferentes tasas de descuento.

Table 3. Optimum age and length of catch for different discount rates.

Tasa de descuento (δ)	Edad óptima	Talla óptima
0	6.27	116.25
5	5.59	109.99
10	5.05	104.39
20	4.26	94.72
30	3.69	86.69
40	3.26	79.92
50	2.93	74.13

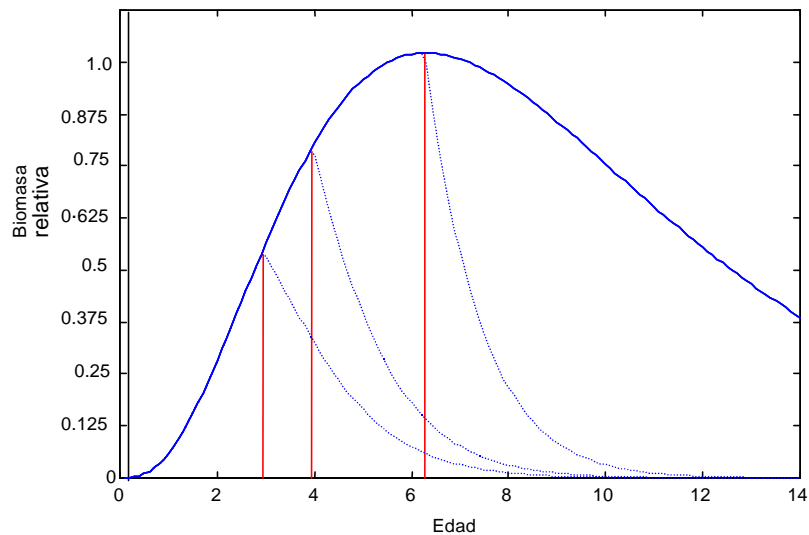


Figura 5. Biomasa de una cohorte de erizo rojo, aplicando una $F = 0.85$, a partir de las edades óptimas 6.27, 3.96 y 2.93 correspondientes a las tasas de descuento de 0%, 25% y 50%, respectivamente. La línea continua es la biomasa que habría en caso de que no existiera mortalidad por pesca, mientras que la línea punteada es la biomasa en presencia de mortalidad por pesca.

Figure 5. Sea urchin cohort biomass, with $F = 0.85$, for optimum ages 6.27, 3.96 and 2.93 corresponding to discount rates 0%, 25% and 50%, respectively. The continuous line is the biomass that would exist in the case of no fishing mortality and the dotted line is the biomass in the presence of fishing mortality.

pesca a una edad de 6.14 años ó 115 mm y terminarla a los 6.47 años de edad ó 118 mm, es decir, el periodo de pesca debe durar aproximadamente 4 meses.

Así mismo, se calculó el intervalo de pesca óptimo para una tasa de mortalidad por pesca de 0.98, correspondiente a la zona IV, ya que esta mortalidad fue el promedio anual más alto en 1996 de las cuatro zonas. El modelo indicó que la pesca se debe realizar cuando los organismos alcanzan una edad entre los 6.15 y 6.4 años, correspondiente a tallas entre 115.2 y 117.3 mm. Lo anterior representa una duración de la temporada de pesca de 3.8 meses solamente.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El modelo de rendimiento por recluta indica que el rendimiento relativo esperado durante 1996 sería muy similar en las cuatro zonas de pesca, es decir, muy cercano a 0.085, a pesar de que la mortalidad por pesca varió de 0.6 en la zona I, equivalente a 2000 mareas de acuerdo con una q de 0.0003 (A. Cota, comunicación personal), hasta 0.98 ó 3266 mareas en la zona II, con una talla de primera captura de 80 mm de diámetro de testa. Sin embargo, es posible que el rendimiento por recluta que se alcanzó realmente durante este año haya sido menor, debido a los siguientes factores: en los valores estimados de mortalidad por pesca no está considerada la pesca furtiva; en algunas ocasiones los pescadores capturan erizos de tallas menores que la talla mínima legal y el reclutamiento es muy variable.

Las estimaciones de rendimiento por recluta del modelo se dan bajo condiciones de equilibrio (como reclutamiento constante) que en la realidad no existen. El rendimiento esperado que se obtiene con el modelo de rendimiento por recluta, con los datos de 1996, en las cuatro zonas de pesca (0.085), es el máximo que se puede alcanzar si se desea mantener la talla de primera captura en 80 mm, con mortalidades por pesca superiores a 0.4. Sin embargo, es de suponer que en la actualidad el rendimiento sea menor debido a las condiciones de población reducida, mortalidad

organism reaches an age between 6.15 and 6.4 years, corresponding to sizes between 115.2 and 117.3 mm. This represents a fishing season of 3.8 months.

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The yield per recruit model indicates that the expected relative yield during 1996 would be very similar in the four fishing zones (close to 0.085), even though the fishing mortality shifted from 0.6 equivalent to 2000 daily trips, according to a q of 0.0003 (A. Cota, personal communication), in zone I, to 0.98 or 3266 daily trips in zone II, with a size at first capture of 80 mm of test diameter. However, it is possible that a lower yield per recruit was reached during this year, due to the following factors: the estimates of fishing mortality rate due to illegal fishing are not considered, fishermen sometimes catch sea urchins under the legal size and recruitment is variable from one year to the next.

The expected yield that was obtained with the yield per recruit model, with 1996 data, in the four fishing zones (0.085), is the maximum that can be achieved if one wants to maintain the size of first capture at 80 mm, with fishing mortalities above 0.4. Nevertheless, we can assume that the actual yield per recruit is lower due to depleted population size, high fishing mortality (including furtive fishing) and unfavorable environmental conditions, like the 1997–1998 El Niño.

To obtain the maximum yield of 0.1 (a 15% increase in yield), it is necessary to increase the size of first capture to 105 mm and maintain a fishing mortality of 0.65 or higher. To achieve a 10.5% increase in yield (yield of 0.095), the size of first capture must increase to 100 mm and a fishing mortality of 0.42 or higher is necessary. It is possible that the percent yield increments are larger because, as mentioned, the relative yields must be lower than what the model indicates.

In the red sea urchin fishery, Cota-Villavicencio *et al.* (1997b), with a dynamic production model, use as a management objective a biological reference point of maximum surplus

por pesca elevada (incluyendo la furtiva) y condiciones ambientales poco favorables como el fenómeno de El Niño 1997–1998.

De acuerdo con el modelo, para alcanzar el máximo rendimiento, es decir 0.1 (aumentar el rendimiento 15%), es necesario aumentar la talla de primera captura a 105 mm y mantener una mortalidad por pesca de 0.65 o mayor. Para lograr un aumento en el rendimiento del 10.5% (rendimiento de 0.095), se requiere aumentar la talla de primera captura a 100 mm y mantener una mortalidad por pesca de 0.42 o mayor. El incremento en la talla de primera captura puede tener un efecto positivo en el reclutamiento debido al efecto “dosel” de los organismos menores que esa talla que no serían explotados. Es posible que los porcentajes de aumento en el rendimiento sean incluso mayores porque, como ya se mencionó, los rendimientos relativos deben estar por debajo de lo que indica el modelo. Inicialmente, si se quieren lograr estos incrementos, se requiere disminuir el esfuerzo de pesca para que la población se recupere.

En el caso del erizo rojo, Cota-Villavicencio *et al.* (1997b), con un modelo de producción dinámica, utilizan como objetivo de manejo un punto de referencia biológico de producción excedente máxima ($PEM = B_0/2$) de 7825 t, con estimaciones de biomasa independientes, inferiores a esta cifra, señalando que el recurso se encuentra por debajo de un nivel saludable. Se ha sugerido que los recursos bentónicos deben mantenerse lo más cerca posible del nivel de rendimiento máximo sostenible como medida precautoria.

En Baja California, México, la talla mínima legal de captura de erizo rojo ha sido 80 mm desde 1993, siendo que en otras localidades se tienen tallas de primera captura un poco mayores. En la costa del Pacífico sur de Canadá, la talla mínima de captura es de 100 mm; se estableció en 1980 para proteger a la población desovante, pues las cosechas realizadas hasta entonces se hacían sobre todas las tallas de erizo. En la costa norte de Canadá, donde inicialmente el esfuerzo era menor (menor número de embarcaciones), se aplicaron diferentes estrategias de manejo. Se puso en

producción ($B_0/2$) de 7825 t, with independent biomass estimates, below this value, showing that the resource is below a sustainable level. It has been suggested that benthic resources should be maintained close to the maximum sustainable yield as a precautionary measure.

In Baja California, Mexico, the minimum legal size of catch of the red sea urchin has been 80 mm since 1983; however, in other places, the first catch size is larger. On the Pacific coast of Canada, the minimum legal size of 100 mm was established in 1980 to protect the spawning population, since the harvest used to include all the sea urchin sizes. On the northern coast of Canada, where initially the effort was lower (less number of fishing boats), different types of management strategies have been used. A minimum catch size of 100 mm and a maximum of 140 mm were put into effect, besides a rotation of fishing grounds similar to what occurs in the state of Washington, USA (Harbo and Hobbs, 1992). In this state, the legal fishing size ranges from 100 mm to a maximum of 133 mm, and the period of capture starts in November and ends in March (Pfister and Bradbury, 1996). In the state of California, the legal fishing size is from 89 to 90 mm (D. Aguilar, personal communication)

The results of the bioeconomical model showed that the size of optimum catch decreases as the discount rate increases. The preservation of the resource through time is pursued by means of the extraction of organisms of larger size.

For the red sea urchin, a discount rate of 5% or lower is recommended considering the social importance of this fishery (Clark, 1985); however, some authors disagree (Lyon, 1996), “because the use of the real interest rate would generate a stream of benefits to future society if the extra benefits of the early period are properly invested”. On the other hand, due to the interest that exists in the preservation of the resource for future generations, not only as an economic asset but also as an ecologically valuable element since it is considered a “key species” due to the impact that it has on the composition and productivity in the benthic communities (Estes *et al.*, 1989 and

efecto una talla mínima de captura de 100 mm y una máxima de 140 mm, además de una rotación de las áreas de pesca similar a la que se maneja en el estado de Washington (Harbo y Hobbs, 1992). En ese estado, la talla legal de captura abarca de 102 a 133 mm y el periodo de captura generalmente va de noviembre a marzo (Pfister y Bradbury, 1996). En California se tiene una talla que varía de 89 a 90 mm, acompañada de un plan de rotación de áreas de pesca (D. Aguilar, comunicación personal).

Los resultados del modelo bioeconómico mostraron que la talla de captura óptima disminuye con el aumento de la tasa de descuento, debido a que tasas de descuento bajas implican que el recurso es tan valioso en el presente como en el futuro. Se busca la preservación del recurso a través del tiempo mediante la extracción de organismos de mayor tamaño.

Para el erizo rojo se recomiendan tasas de descuento del 5% o menores, considerando la importancia social de su pesquería (Clark, 1985); sin embargo, algunos autores no están de acuerdo (Lyon, 1996), “porque el uso de la tasa de interés real generaría una cadena de beneficios para las generaciones futuras si los beneficios extras del periodo inicial son invertidos adecuadamente”. Por otro lado, debido al interés que existe en la preservación del recurso para las generaciones futuras, no sólo desde el punto de vista de un activo económico sino por su valor ecológico, al ser considerado una “especie clave” por el impacto que tiene en la composición y productividad en las comunidades bentónicas (Estes *et al.*, 1989 y Levitan, 1992, citados por Quinn *et al.*, 1993), consideramos que una tasa de descuento baja es razonable.

Cuando el pescador participa más en la administración del recurso (concesión u otorgamiento del permiso de pesca por más de un año) se aplican tasas de descuento bajas; por el contrario, cuando el pescador extrae los recursos para obtener la mayor ganancia posible en el presente (permiso de un año), implica el manejo de tasas de descuento altas.

Levitan, 1992, cited in Quinn *et al.*, 1993), we consider a low discount rate a reasonable one.

When the fisherman participates more in the management of the resource (with a concession or a fishing permit for more than one year), lower discount rates are applied; on the contrary, when the fisherman exploits the resources to obtain a bigger profit in the present (fishing permit for one year), without worrying about the conservation of the resource for future generations, higher discount rates are applied.

There is some difference between the results of the yield per recruit model and the dynamic optimization model in relation to the size that maximizes the yields; the former indicates that the optimum size is 105 mm, whereas the latter shows that it must be between 110 and 116 mm (discount rates lower than 5%). This difference is due to the considerations of each model. The yield per recruit model considers biological factors (L_{∞} , K and M) and the dynamic optimization model, biological as well as economical factors (K , t_0 , M and δ); nevertheless, both suggest that it is convenient to increase the size of first capture.

For the discount rate equal to zero, a great fishing effort is needed to harvest all the available biomass in a very short period of time, when the organisms reach an optimum size. For this reason, a time interval in which fishing can take place at a maximum rate was calculated. This estimate was done with two different fishing mortality rates, 0.4 and 0.98, and in both cases the duration of the optimum fishing interval was four months. The fishing season in Baja California starts in July and ends in February. This model suggests that the fishing season can be reduced by half and still obtain proper yields; however, such a drastic reduction in the fishing season could cause social problems, because many people depend directly on the exploitation of this resource and the time of unemployment that they would face is too long. Besides, reducing the fishing season does not guarantee that the fishing pressure will lessen, since there could be an increase in fishing effort to compensate for the reduction of the fishing

Existe cierta diferencia entre los resultados del modelo de rendimiento por recluta y el de optimización dinámica en cuanto a la talla que permite maximizar los rendimientos; el primero indica que la talla óptima es de 105 mm, mientras que el segundo indica que debe ser entre 110 y 116 mm (tasas de descuento menores que 5%). Esta diferencia se debe a las consideraciones de cada modelo. El modelo de rendimiento por recluta está en función de factores biológicos (L_{∞} , K y M) y el de optimización dinámica de factores tanto biológicos como económicos (K , t_0 , M y δ); sin embargo, ambos sugieren que es conveniente aumentar la talla de primera captura.

Para el caso de la tasa de descuento igual a cero, se necesita un enorme esfuerzo de pesca para cosechar toda la biomasa aprovechable en un periodo de tiempo muy corto, esto es, cuando los organismos alcanzan la talla óptima. Por esta razón, se calculó un intervalo de tiempo en el cual la pesca se efectúa a una tasa máxima. Este cálculo se hizo con dos diferentes tasas de mortalidad, 0.4 y 0.98, y en ambos casos la duración del intervalo de pesca óptimo resultó ser de cuatro meses. Actualmente, en Baja California la temporada de pesca dura ocho meses (de julio a febrero). Este modelo sugiere que la temporada de pesca puede ser reducida a la mitad y, aun así, obtener rendimientos apropiados; sin embargo, una reducción tan drástica en la temporada de pesca podría ocasionar problemas de tipo social, porque muchas personas dependen directamente de la explotación de este recurso y el lapso de desempleo al que tendrían que enfrentarse es muy largo. Además, disminuir la temporada de captura no es una garantía de que la presión de pesca aminore, ya que por el contrario, puede aumentar el esfuerzo pesquero para compensar la reducción en la temporada de pesca. En otras localidades, como por ejemplo en el estado de Washington, la temporada de pesca dura por lo general cinco meses, de noviembre a marzo, pero las condiciones sociales y del recurso son diferentes.

Los modelos utilizados en este trabajo, como todos, tienen ciertas limitantes y fuentes de error.

In other places, for example the state of Washington, the fishing season last five months, from November to March, but the social conditions are different.

The models used in this work, like all models, have some limitations and sources of errors. Some of the parameters used in these models (L_{∞} , K and M) change in time and space. The considerations reached with the yield per recruit model assume that the F values are correct; however, as already mentioned, illegal fishing is not considered. The dynamic optimization model, in contrast to other bioeconomical models, does not consider the cost/price ratio, even though it is important to determine the optimum fishing size. Even under these conditions, these models can help in the taking of decisions in the management of the red sea urchin fishery.

English translation by the authors.

Algunos de los parámetros usados en estos modelos (L_{∞} , K y M) cambian en tiempo y en espacio. Las consideraciones hechas con el modelo de rendimiento por recluta parten de que los valores de F son correctos; sin embargo, como ya se mencionó, no está considerada la pesca furtiva. El modelo de optimización dinámica, a diferencia de otros modelos bioeconómicos, no está en función de la relación costo/precio, a pesar de que ésta es importante para determinar la talla óptima de captura. Aun bajo estas condiciones y las consideraciones hechas, estos modelos pueden ayudar en la toma de decisiones para el manejo de la pesquería del erizo rojo.

REFERENCIAS

- Almanza-Heredia, E. (1997). Análisis de un esquema mixto de explotación y conservación para los recursos bentónicos de escasa movilidad en Baja California. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México, 57 pp.

- Arredondo-Gómez (1994). La microempresa en Baja California. Paradigmas (UABC), Año 2(5): 33–42.
- Beverton, R.J.H. and Holt, S.J. (1964). Tables of yield functions for fishery assessment. FAO Fish. Tech. Pap., (38): 49 pp.
- Clark, C.W. (1976). Mathematical Bioeconomics: The Optimal Management of Renewable Resources. John Wiley, New York, 230 pp.
- Clark, C.W. (1985). Bioeconomic Modelling and Fisheries Management. John Wiley, New York, 291 pp.
- Cota-Villavicencio, A., Aguilar-Montero, D., Romero-Martínez, M. y Uribe-Osorio, F. (1996). Análisis de las capturas comerciales del erizo rojo (*Strongylocentrotus franciscanus*) explotado en la costa noroccidental de Baja California. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, México, (2): 1–4.
- Cota-Villavicencio, A., Aguilar-Montero, D. y Romero-Martínez, M. (1997a). Estimación de abundancia y mortalidad por pesca del erizo *Strongylocentrotus franciscanus* y morado *S. purpuratus* que se explotan en las costas de Baja California, México. Informe Técnico, Centro Regional de Investigación Pesquera, Ensenada, 20 pp.
- Cota-Villavicencio, A., Aguilar-Montero, D., Romero-Martínez, M. y Uribe-Osorio, F. (1997b). La pesquería del erizo rojo *Strongylocentrotus franciscanus* de Baja California, México. Dictamen Técnico para la Temporada de Pesca 1997–1998, Centro Regional de Investigación Pesquera, Ensenada, 22 pp.
- Ebert, T.A. and Russell, M.P. (1992). Growth and mortality estimates for red sea urchin *Strongylocentrotus franciscanus* from San Nicolas Island, California. Mar. Ecol. Prog. Ser., 81: 31–41.
- FAO (1995). Anuario Estadístico de Pesca 1994. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 385 pp.
- Harbo, R. and Hobbs, K. (1992). Sea urchin fisheries of British Columbia, Canada. Presented at the Sea Urchin, Kelp and Abalone Conference, Sea Grant Program, University of California, Bodega Bay Marine Laboratory. Bodega Bay, California. 18–21 March, 1992, pp. 1–8.
- Huston, M.A. and De Angelis, L. (1987). Size bimodality in monospecific populations: A critical review of potential mechanisms. Am. Nat., 129(5): 687–707.
- Kato, S. (1972). Sea urchins: A new fishery develops in California. Mar. Fish. Rev., 34(9–10): 23–30.
- Kato, S. and Schroeter, S.C. (1985). Biology of the red sea urchin *Strongylocentrotus franciscanus*, and its fishery in California. Mar. Fish. Rev., 47(3): 1–20.
- Lelevier, A. y Palleiro-Nayar, J. (1987). Evaluación del stock de erizo rojo *Strongylocentrotus franciscanus* en Baja California. En: E.M. Ramírez-Rodríguez (ed.), Memorias del Simposium sobre Investigación en Biología y Oceanografía Pesquera en México. La Paz, BCS, pp. 139–146.
- Lyon, K.S. (1996). Why economists discount future benefits. Ecol. Mod., 92: 253–262.
- Palleiro-Nayar, J.S., Navarrete-Gutiérrez, M. y Lelevier-Grijalva, A. (1988). Biología del erizo rojo, *Strongylocentrotus franciscanus*, y su pesquería en Baja California. En: Los Recursos Pesqueros del País. Primera edición. SEPESCA, INP, México, pp. 53–73.
- Palleiro-Nayar, J.S., Aguilar-Montero, D. y Romero, J.M. (1991). La pesquería del erizo rojo *Strongylocentrotus franciscanus* en Baja California, México. Taller México-Australia sobre Reclutamiento de Recursos Bentónicos de Baja California. Pesca, IPN, pp. 81–89.
- Pérez y Rodríguez, S.M. (1995). Análisis biológico pesquero del erizo rojo *Strongylocentrotus franciscanus* y morado *S. purpuratus* de la zona II de pesca de Baja California, México. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, BC, México, 105 pp.
- Pfister, C.A. and Bradbury, A. (1996). Harvesting red sea urchins: Recent effects and future predictions. Ecol. Appl., 6(1): 298–310.
- Quinn, J.F., Wing, S.R. and Botsford, L.W. (1993). Harvest refugia in marine invertebrate fisheries: models and applications to the sea urchin, *Strongylocentrotus franciscanus*. Am. Zool., 33: 537–550.
- Ramírez-Félix, E.A. (1997). La concesión para explotación pesquera y su efecto en el erizo rojo (*Strongylocentrotus franciscanus*, A. Agassiz, 1863) en el área de Santo Tomás a Punta China, Baja California. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México, 93 pp.
- Ramos-Mancilla, M.T. (1985). Relaciones inter-específicas del erizo rojo *Strongylocentrotus franciscanus* (Agassiz, 1863) en la comunidad de un manto de algas pardas (*Macrocystis pyrifera*) en la zona de Jatay, Baja California, México. Informe

- Memoria del Curso de Titulación, Universidad Autónoma de Baja California, 26 pp.
- Ricker, W.E. (1975). Computation and interpretation of biological statistics of fish populations. Bull. Fish. Res. Board Canada, 191, 382 pp.
- Secretaría de Pesca (1987). Esquema de regulación propuesto para la administración de la pesquería de erizo rojo y morado de la costa oeste de Baja California. Consulta popular para la planeación democrática de la pesca en materia de administración de pesquerías. Secretaría de Pesca. Documento interno, 23 pp.
- Tegner, M.J. (1980). Multispecies considerations of resource management in southern California kelp beds. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci., 954: 125–143.
- Tegner, M.J. and Dayton, P.K. (1981). Population structure, recruitment and mortality of two sea urchins, *Strongylocentrotus franciscanus* and *S. purpuratus*, in a kelp forest near San Diego, California. Mar. Ecol. Prog. Ser., 5(3): 255–268.
- Tegner, M.J. and Levin, L.A. (1983). Spiny lobster and sea urchins: Analysis of predator-prey interactions. J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 73: 125–150.