

## Modelo de optimización para el cálculo de la cuota de captura de langostino amarillo

Víctor Albornoz<sup>1</sup>, Cristian Canales<sup>2</sup> & Romina Fazzi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Industrias, Universidad Técnica Federico Santa María  
Av. Santa María 6400, Santiago, Chile

<sup>2</sup>División de Evaluación de Pesquerías Nacionales, Instituto de Fomento Pesquero  
Av. Blanco 839, Valparaíso, Chile

**RESUMEN.** Se presenta un modelo de optimización no-lineal que provee una cuota anual de captura para el manejo de la pesquería de langostino amarillo. El modelo bioeconómico propuesto contempla la maximización del beneficio económico asociado a la explotación del recurso y, simultáneamente, toma en cuenta la preservación del mismo en el largo plazo, restringiendo el valor de las capturas de modo de garantizar niveles adecuados de biomasa en el futuro. El comportamiento dinámico de la población es incorporado a través de un modelo de crecimiento logístico mono-especie. La estimación de parámetros, como la tasa de crecimiento, el máximo poblacional y esfuerzo de pesca, se basó en una técnica de muestreo a partir de series históricas de biomasa y rendimiento de pesca. Se muestran los resultados alcanzados en el empleo de esta metodología y su aplicación en la planificación del recurso en el norte de Chile.

**Palabras clave:** cuota de captura, programación no-lineal, planificación, langostino amarillo, Chile.

### An optimization model for computing the total allowable catch quota for yellow squat lobster

**ABSTRACT.** This paper presents a nonlinear optimization model that use to establish an annual quota for the total allowable catch for managing the yellow squat lobster fishery. The proposed bioeconomic model maximizes the economic profits of the activity involved and, simultaneously, takes into account the long-term conservation of the resource by restricting catches and thereby assuring adequate biomass level in the future. The dynamic behavior of the population is incorporated through a single-specie logistic growth model. Parameters (e.g., growth rate, maximum population and effort) were estimated based on a sampling technique using historical biomass reports and fishing yields. The results obtained with this methodology are shown, as is their application in managing this particular fishery in the north of Chile.

**Key words:** quota, nonlinear optimization, planning, squat lobster, Chile.

---

Autor correspondiente: Víctor Albornoz (victor.albornoz@usm.cl)

### INTRODUCCIÓN

Desde los años '90 la extracción de langostino amarillo está regulada por la Ley General de Pesca y Acuicultura N° 18.892 del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción. Dicha ley establece inicialmente, entre otras medidas, cuotas anuales de captura por unidad de pesquería. Con posterioridad, se agrega un sistema de límites máximos de captura por armador, que promueve el ordenamiento y la eficiencia de la actividad desarrollada por la flota.

La tendencia mundial en el manejo de pesquerías

conlleva precisamente el otorgamiento de derechos exclusivos de pesca a quienes constituyen el sector pesquero comercial. En Chile, el instrumento de regulación pesquera más importante lo constituye igualmente la fijación de cuotas de captura para cada especie, las que anualmente son establecidas por la Subsecretaría de Pesca.

La intervención del Estado en la actividad pesquera extractiva persigue dos objetivos importantes. Por una parte, la conservación biológica de los re-

ursos y los ecosistemas marinos que lo sostienen, de modo de garantizar una actividad sustentable en el largo plazo; y por otra, la reducción de las deficiencias económicas observadas en este sector de la economía nacional. Sin embargo, hasta ahora la fijación de cuotas de capturas ha tomado en cuenta esencialmente aspectos biológicos, pero no ha considerado en forma explícita la eficiencia económica.

En este trabajo se presenta un modelo de optimización que provee una cuota anual de captura, sobre un horizonte de planificación de largo plazo, que junto con garantizar niveles mínimos (dados) de biomasa para la conservación de la especie, maximiza la renta actualizada de la pesquería de langostino amarillo (*Cervimunida johni*), sujeta a restricciones de tamaño de la flota y de la cantidad de viajes de pesca.

La pesquería de langostino amarillo que se desarrolla en la zona centro-norte de Chile (26°00' - 32°10'S) se extiende hasta las 20 mn de la costa. El recurso es capturado por una flota arrastrera compuesta por 10 embarcaciones, cuyas esloras fluctúan entre 20 y 25 m.

Los inicios de esta pesquería se remontan a la década del 50, donde la extracción del recurso era como fauna acompañante de la pesca de merluza común. Esta alcanzó su nivel máximo de explotación en 1967, con alrededor de 20 mil ton, luego de lo cual sobrevino un periodo de bajas capturas que concluye en 1990 con el término del régimen de libre acceso y la circunscripción de esta pesquería a las regiones de Atacama y Coquimbo.

Luego, la pesquería es declarada en régimen de plena explotación y comienza a ser regulada con cuotas anuales de captura (D.S. MINECON N°377, del 22/07/95). El mayor nivel de capturas en esta década alcanzó 7 mil ton (1991), las que posteriormente se han reducido sistemáticamente producto del control de la explotación y del nivel de biomasa existente. En este sentido, en la Figura 1 es posible apreciar el nivel de la biomasa y las capturas reportadas durante estos años, donde destaca también la reducción en la población debido principalmente a altos niveles de desembarques registrados hacia mitad de los noventa.

A partir del año 2001, la pesquería se somete a un sistema de cuotas individuales de captura con un límite máximo de captura por armador, las que se fijan según un porcentaje de acuerdo con su participación histórica (Ley N°19.713, de 2001).

Cabe mencionar que la explotación ha estado orientada principalmente a la elaboración de productos congelados para exportación, siendo Estados Unidos y Europa los principales destinos de los embarques.

Una parte importante del trabajo desarrollado previamente por diferentes autores en relación con el conocimiento y manejo del recurso puede consultarse, entre otras fuentes, en Canales *et al.* (2001), Espejo *et al.* (2002), Fazzi (2002), Canales *et al.* (2003), Quiroz *et al.* (2004) y Montenegro *et al.* (2004). Estos se abocan principalmente al análisis de la dinámica poblacional, de modelos de evaluación y de monitoreo de la actividad extractiva.

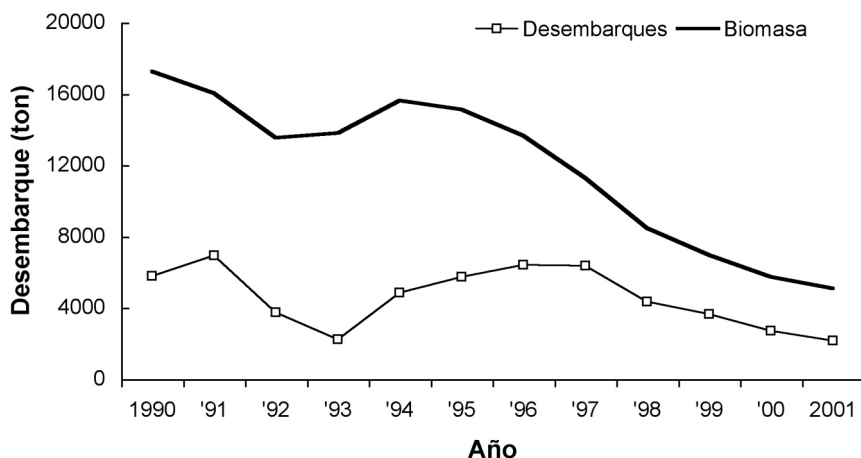


Figura 1. Nivel de capturas y biomasa del langostino amarillo.

Figure 1. Yellow squat lobster catches and biomass.

## MATERIALES Y MÉTODOS

En general, la obtención de una cuota de captura anual requiere del conocimiento de la dinámica de la población. En este caso, la dinámica queda representada por medio de un modelo de producción logístico que expresa el nivel de biomasa al final de cada periodo, en función de la biomasa al inicio del periodo, la velocidad de crecimiento de la población y la captura efectuada en ese lapso.

En este contexto, existen numerosas referencias de interés que contemplan el uso de modelos de optimización para establecer cuotas de captura, algunas citas que se destacan corresponden a los trabajos de Clark (1990), Morgan (1995), Karagiannakos (1996), Eggert (1998), Batstone & Sharp (1999), Quinn & Deriso (1999), Dew (2001), Leung *et al.* (2001), Escapa & Prellezo (2003), Bjorndal *et al.* (2004), Katsukawa (2004), Ussif & Sumaila (2005) y Albornoz & Canales (2002, 2006). Sin embargo, las particularidades en la regulación de cada pesquería, así como las condiciones adoptadas para representar el medio en que están insertas, conducen al modelo específico empleado en este trabajo.

De manera resumida, el modelo propuesto contempla la maximización de los beneficios totales de esta actividad extractiva, dado por la diferencia entre ingresos y costos asociados al problema. Por su parte, las principales restricciones expresan, para cada año, el nivel de biomasa resultante al final de un periodo, los límites mínimos de escape (biomasa mínima crítica) y cotas en el número de viajes de la flota, que impone a su vez una cota superior en los niveles de captura. Cabe señalar, que en este trabajo se ha optado por emplear el número de viajes en lugar de las horas de arrastre, debido a la directa asociación de los primeros con los costos de operación.

A continuación, se detalla la formulación de un modelo de optimización no-lineal donde  $T$  es el número total de años del horizonte de planificación,  $p_t$  representa el ingreso por venta de cada tonelada capturada en el año  $t$  (que toma en cuenta el rendimiento promedio del proceso productivo),  $c_t$  equivale al costo variable por cada tonelada extraída del recurso en el año  $t$ ,  $\rho$  es la tasa de descuento,  $B_0$  la biomasa al inicio del primer año,  $r$  la tasa de crecimiento promedio de la población,  $K$  el nivel máximo de biomasa que soporta el ecosistema,  $NV_{\max}$  es el límite superior impuesto a las capturas en cada periodo a través del número máximo de viajes,  $B_{\min}$  corresponde a un nivel de biomasa mínimo que se desea imponer al final del horizonte de planificación y  $\tau$  una fracción de

la capacidad de carga que determina el nivel mínimo de biomasa en cada periodo.

Por otra parte, las variables de decisión del modelo de optimización corresponden a la captura  $C_t$  autorizada para el año  $t$ , la biomasa resultante  $B_t$  al final del año  $t$  y la variable  $NV_t$  correspondiente al número total de viajes de las embarcaciones durante el año  $t$ , para  $t=1, \dots, T$ . El modelo propuesto corresponde entonces a:

$$\text{Max } \sum_{t=1, T} (p_t C_t - c_t NV_t) / (1 + \rho)^{t-1} \quad (1)$$

sujeto a:

$$B_t = B_{t-1} + rB_{t-1}(1 - B_{t-1}/K) - C_t \quad t=1, \dots, T \quad (2)$$

$$C_t = B_{t-1} - B_{t-1} \exp(-qNV_t) \quad t=1, \dots, T \quad (3)$$

$$0 \leq NV_t \leq NV_{\max} \quad t=1, \dots, T \quad (4)$$

$$B_t \geq \tau K \quad t=1, \dots, T \quad (5)$$

$$B_T \geq B_{\min} \quad (6)$$

La función objetivo (1) representa la renta total actualizada, según una cierta tasa de descuento. En cada año, la renta es la diferencia entre los ingresos por las toneladas extraídas y los costos asociados al nivel de explotación. Entre los costos variables, que determinan el parámetro  $c_t$ , se considera el consumo de combustible, bonos de desempeño, material de pesca, gastos en puerto, ropa de trabajo y cobros de administración en puerto. La restricción no-lineal (2) entrega el nivel de la biomasa al final de cada año, resultante del crecimiento de la población y de la decisión de captura adoptada en cada periodo. La ecuación corresponde a un modelo logístico, que en ausencia de capturas expresa que la tasa de cambio de la población es nula si la población se extingue o si alcanza su máximo nivel de biomasa ( $K$ ). La restricción (3) resume la ecuación clásica de captura con mortalidad natural despreciable durante el periodo de pesca, reparametrizada en función del esfuerzo de pesca (número de viajes). El coeficiente de capturabilidad es obtenido en un proceso previo de ajuste del modelo junto a los parámetros  $K$  y  $r$  antes mencionados. La restricción (4) impone niveles mínimos y máximos para el esfuerzo de pesca. La restricción (5) impone un nivel mínimo de escape para la conservación de la especie. Finalmente, en (6) se impone un nivel mínimo de biomasa al final del horizonte de planificación, para imponer al mo-

delo niveles que contribuyan a la recuperación de la especie frente a los bajos niveles actuales de esta pesquería.

Adicionalmente, se exploraron otros modelos que junto con maximizar las rentas, agregan un término en la función objetivo que permite hacer mínima la variabilidad en la captura respecto de un valor dado o, simplemente, mínima la varianza de las capturas (Fazzi, 2002). Todo esto con el propósito de proveer decisiones óptimas de captura más estables de un año a otro y evitar un impacto mayor en el sector económico que depende de la extracción del recurso. En cualquier caso, esta clase de modelos debe ser empleado en un esquema de horizonte rodante, que resuelto en lo sucesivo al inicio de cada año, considera un nuevo periodo de planificación al final para conservar la extensión del horizonte de planificación empleado. En este esquema, se toma en cuenta sólo el valor óptimo para la decisión a adoptar en el primer periodo y la cuota de captura del primer año de planificación.

## RESULTADOS

Para resolver el modelo propuesto se requiere, una buena estimación de los parámetros  $q$ ,  $r$ ,  $K$  y  $B_0$ . Estos fueron obtenidos previo ajuste estadístico del modelo de biomasa indicado en la restricción (2). Para esto se utilizaron las estadísticas de desembarques registrados por el Servicio Nacional de Pesca, series de biomasa en diferentes años, estimadas por medio de cruceros de evaluación directa desarrolladas por el Instituto de Fomento Pesquero (IFOP), y series de rendimiento de pesca (capturas por unidad de esfuerzo), registradas también por IFOP.

Los parámetros estimados en la ecuación de la dinámica poblacional (2), empleando el método de máxima verosimilitud (McAllister & Ianelli, 1997), se resumen en la Tabla 1.

**Tabla 1. Parámetros estimados para el modelo poblacional del langostino amarillo.**

**Table 1. Estimated parameters for the yellow squat lobster dynamic model.**

K (ton)	50.480
r	0,4044
q	0,00084
$B_0$ (ton)	6.004

Como valor de biomasa inicial se puede utilizar directamente el valor deducido del ajuste del modelo dinámico (2) a los datos históricos y de manera alternativa, utilizando la última prospección pesquera.

Los restantes parámetros del modelo consideran un horizonte de planificación de  $T = 10$  años, un ingreso  $p_t = 1.350$  US\$/ton de captura, un costo  $c_t = 3.258$  US\$/viaje, una tasa de descuento  $\rho = 12\%$ , un nivel de biomasa al término de los 10 años  $B_{\min}$  que se propone llevar a 12 mil ton, una cota superior de  $NV_{\max} = 1000$  viajes y un valor de  $\tau = 0,04$ , que permite definir una biomasa crítica. El modelo propuesto en (1)-(6) fue formulado empleando el programa computacional de modelado algebraico AMPL (Fourer *et al.*, 2003) y resuelto con el solver MINOS 5.5 que se invoca desde el mismo AMPL.

La principal dificultad que presenta la resolución computacional del modelo es la no-convexidad del problema, que podría llevar a obtener tan sólo máximos locales. En consecuencia, los valores óptimos reportados corresponden a la mejor solución encontrada por MINOS. La Figura 2 muestra la trayectoria de la biomasa  $B_t$  en el futuro y los niveles de captura  $C_t$  entregados en la resolución del modelo a través del horizonte de planificación estudiado.

Los resultados muestran que la recuperación de la biomasa se logra con una veda sostenida de tres años, seguida de un régimen de capturas ascendentes, que al cabo del sexto año podría llegar a las 5 mil ton. Al final del horizonte de planificación, el modelo no tiene ningún incentivo económico para dejar una biomasa por sobre el nivel impuesto del parámetro  $B_{\min}$ , de ahí que la decisión de captura del año 10 sea extraer una cantidad aún mayor que en los años anteriores (empleando de hecho la cota superior del número de viajes), que muestra también el efecto que provoca el adoptar un horizonte de planificación finito en el modelo y una tasa de descuento que desvaloriza los flujos de renta en el tiempo.

Con el propósito de estudiar la magnitud de los cambios que provocan valores distintos a los adoptados en los diferentes parámetros del modelo (1)-(6), a continuación se muestran los valores óptimos frente a cambios (por separado) en la tasa de descuento  $\rho$ , el costo variable  $c_t$  (donde el costo de combustible representa cerca del 40% del valor del parámetro  $c_t$ ) y el nivel mínimo de la biomasa al término del horizonte de planificación ( $B_{\min}$ ). La Tabla 2 resume los valores óptimos del modelo con tasas de descuento del 10%, 12%, 14% y 16%, donde el 12% fue la tasa adoptada inicialmente.

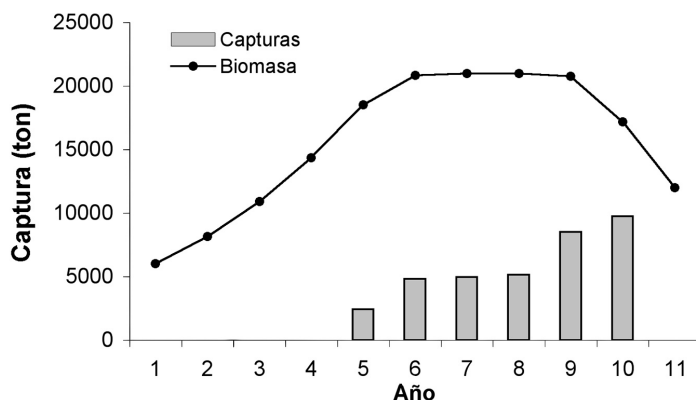


Figura 2. Niveles de captura y biomasa arrojados por el modelo.

Figure 2. Catches and biomass levels given by the model.

Tabla 2. Beneficio alcanzado ante distintas tasas de descuento.

Table 2. Optimal profit for different discount rates.

Tasa (%)	Beneficio (US\$)
10	12.582.962
12	10.711.363
14	9.142.990
16	7.822.682

La Tabla 3 muestra los resultados alcanzados por el modelo frente a variaciones porcentuales en el costo variable, respecto del valor empleado inicialmente ( $c_t = \text{US\$ } 3.258$  por viaje), donde el valor óptimo está expresado en dólares.

Por último, la Tabla 4 resume el valor óptimo alcanzado por el modelo para diferentes valores de  $B_{\min}$ , que representa la cantidad de toneladas exigidas como biomasa al final del horizonte de planificación, fijada inicialmente en 12 mil ton.

Tabla 3. Beneficios alcanzados ante variaciones en el costo del combustible.

Table 3. Optimal profit for different fuel costs.

Variación (%)	Beneficio (US\$)
-30	11.914.443
-20	11.509.544
-10	11.108.553
0	10.711.363
10	10.317.640
20	9.928.019
30	9.541.701

Tabla 4. Beneficio obtenido ante diferentes valores en la biomasa final.

Table 4. Optimal profit for different biomass levels at the end of the horizon.

$B_{\min}$ (ton)	Beneficio (US\$)
16.000	9.426.030
15.000	9.780.403
14.000	10.121.045
13.000	10.438.098
12.000	10.711.363
11.000	10.938.531
10.000	11.115.365

## DISCUSIÓN

El análisis de sensibilidad muestra una mayor variabilidad en el valor óptimo y en los niveles de explotación frente a fluctuaciones en la tasa de descuento  $\rho$ , que ante cambios en los costos variables  $c_t$  y la biomasa final  $B_{\min}$ . Frente a una tasa del 10% (que corresponde a un 16,6% por debajo del valor inicial), los beneficios totales aumentan 17,5% y se privilegian las capturas de los últimos períodos. Por el contrario, frente a tasas de descuento por sobre el 12%, los beneficios disminuyen en el mismo orden de las variaciones. Por su parte, las capturas hacia el final también se reducen, manteniéndose la veda en los primeros años del horizonte de planificación.

Por otra parte, un aumento de un 10, 20 y 30% en los costos variables, sobre todo el horizonte de planificación, provoca una disminución del 3,7; 7,3

y 10,8% en los ingresos totales, respectivamente. Por su parte, al aumentar los niveles deseados de biomasa hacia el final del horizonte de planificación, se produce evidentemente una disminución en el valor de la función objetivo. Por ejemplo, frente a aumentos de 16,7 y 33,3% respecto del valor inicial de  $B_{\min}$ , el beneficio óptimo disminuye sólo en un 5,5 y 12%, respectivamente. Estas variaciones resultan poco significativas en términos relativos y aconsejarían incluso aumentar los niveles impuestos de biomasa al final del horizonte de planificación, a valores por sobre el doble de la biomasa actual.

## CONCLUSIONES

El modelo propuesto junto con proveer una decisión de captura para el primer periodo de planificación, considera un horizonte de planificación de largo plazo que toma en cuenta el impacto de esta decisión en la explotación y conservación futura de este recurso pesquero.

Los resultados obtenidos a la fecha de este estudio, recomendaban una cuota de captura nula, consistentemente para todas las instancias y formulaciones abordadas, debido por cierto al bajo nivel actual de la biomasa. Se espera, de igual modo, la extensión de este periodo de veda según dan cuenta las soluciones propuestas para diferentes escenarios e instancias consideradas en este estudio. No obstante lo anterior, la obtención de una cuota de captura no nula en cualquier año del horizonte de planificación, puede ser igualmente incorporada en este tipo de modelos a través de restricciones en la variabilidad anual de las cuotas y/o imponiendo un nivel de captura mínimo durante todo el horizonte de evaluación.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias al apoyo de la Dirección General de Investigación y Postgrado de la Universidad Técnica Federico Santa María, a través del financiamiento otorgado al Proyecto de Investigación USM 28.04.21.

## REFERENCIAS

**Albornoz, V. & C. Canales. 2002.** Planificación de la conservación y explotación del langostino colorado

usando un modelo de optimización estocástica no-lineal con recurso. *Inf. Tecnol.*, 13(4): 183-190.

**Albornoz, V. & C. Canales. 2006.** Total allowable catch for the management of the squat lobster fishery using stochastic nonlinear programming. *Comput. Ops. Res.*, 33: 2113-2124.

**Batstone, C. & B. Sharp. 1999.** New Zealand's quota management system: the first ten years. *Mar. Policy*, 23(2): 177-190.

**Bjorndal, T., D.E. Lane, & A. Weintraub. 2004.** Operational research models and the management of fisheries and aquaculture: a review. *Eur. J. Opl Res.*, 156: 533-540.

**Canales, C. 2001.** Formulación de un modelo de programación estocástica como herramienta de planificación y control de la explotación del langostino colorado sobre un horizonte de largo plazo. Tesis de Ingeniería Civil Industrial, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile, 55 pp.

**Canales, C., H. Pool, C. Montenegro & T. Peñailillo. 2001.** Investigación y evaluación y CTP langostino amarillo. Instituto de Fomento Pesquero. Informe Final, 92 pp.

**Canales, C., J.C. Quiroz & C. Montenegro. 2003.** Investigación y evaluación captura total permisible langostino amarillo. Instituto de Fomento Pesquero. Informe Final, 31 pp.

**Clark, C.W. 1990.** Mathematical bioeconomics. Optimal management of renewable resources. Wiley-Interscience, New York, 400 pp.

**Dew, I. 2001.** Theoretical model of a new fishery under a simple quota management system. *Ecol. Model.*, 143(1-2): 59-70.

**Espejo, V., C. Canales & C. Montenegro. 2002.** Investigación y evaluación y CTP langostino amarillo 2002. Instituto de Fomento Pesquero-Subsecretaría de Pesca. Informe Final, 54 pp.

**Eggert, H. 1998.** Bioeconomic analysis and management. *Environ. Resour. Econ.*, 11(3-4): 399-411.

**Escapa, M. & R. Prelezo. 2003.** Fishing technology and optimal distribution of harvest rates. *Environ. Resour. Econ.*, 25: 377-394.

**Fazzi, R. 2002.** Formulación de modelos de programación estocástica para la planificación de la explotación del langostino amarillo. Tesis de Ingeniería

Civil Industrial, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile, 76 pp.

**Fourer, R., D.M. Gay & B.W. Kernigham. 2003.** AMPL: a modeling language for mathematical programming. Duxbury Press, USA, 517 pp.

**Karagiannakos, A. 1996.** Total allowable catch quota management system in the European Union. *Mar. Policy*, 20(3): 235-248.

**Katsukawa, T. 2004.** Numerical investigation of the optimal control rules for decision making in fisheries management. *Fish. Sci.*, 70: 123-131.

**Leung, P., K. Heen & H. Bardarson. 2001.** Regional economic impacts of fish resources utilization from Barents Sea: trade-offs between economic rent, employment and income. *Eur. J. Opl. Res.*, 133: 432-446.

**McAllister, M. & J. Ianelli. 1997.** Bayesian stock assessment using catch-age data and the sampling-importance resampling algorithm. *Can. J. Fisheries Aquat. Sci.*, 54: 284-300.

**Montenegro, C., G. Arriagada, M. Zilleruelo, J.C. Quiroz, C. Canales, M. Nilo, E. Palta, C. Toledo, P. Gálvez & J. Pérez. 2004.** Investigación situación pesquería crustáceos 2003. Instituto de Fomento Pesquero-Subsecretaría de Pesca. Informe Final, 228 pp.

**Morgan, G. 1995.** Optimal fisheries quota allocation under a transferable quota management system. *Mar. Policy*, 19(5): 379-390.

**Quinn, T.J. & R.B. Deriso. 1999.** Quantitative fish dynamic. Oxford University Press, New York, 542 pp.

**Quiroz, J.C., C. Canales & C. Montenegro. 2004.** Investigación y evaluación captura total permisible langostino amarillo, 2004. Instituto de Fomento Pesquero-Subsecretaría de Pesca. Informe Final, 65 pp.

**Ussif, A.M. & U.R. Sumaila. 2005.** Modeling the dynamics of regulated source systems: a fishery example. *Ecol. Econ.*, 52: 469-479.

*Recibido: 13 enero 2005; Aceptado: 20 marzo 2006*