

Optimización y simulación dinámica de la especie carachi (*Orestias agassii*) para el manejo sostenible de la pesca en el lago Titicaca

Giovana Calsín Quispe

*Universidad Andina Néstor
Cáceres Velásquez*

Ramón Rosales Álvarez

*Universidad de los Andes -
Bogotá - Colombia*

Edson Apaza Mamani

*Universidad Nacional del
Altiplano - Puno*

Resumen

Se desarrollan tres modelos para el análisis de la pesquería de la especie carachi en el lago Titicaca (Perú-Bolivia). Mediante el modelo bioeconómico, para el estado estacionario, se encuentran los puntos de referencia de: máximo rendimiento sostenible (MRS), máximo rendimiento económico (MRE) y libre acceso (LA). La extracción (X) y el esfuerzo (E) promedio actual en la explotación del recurso es de 2.216 t y 8.857 pescadores por año, valores superiores a los óptimos encontrados desde el punto de vista del MRE de una extracción promedio de 1.599 t, con un esfuerzo de 3.016 pescadores anuales, para mantener una biomasa de 19.207 t. El modelo dinámico basado en la teoría de control óptimo indica que los niveles de estado estacionario son sensibles a cambios en los parámetros de precio y costos unitarios de extracción. A partir del modelo de programación dinámica, se estiman valores óptimos de extracción del recurso para distintos niveles de *stock* disponible estable en el largo plazo, los cuales oscilan entre 1.160 y 2.320 t.

Palabras clave: pesca artesanal, modelos bioeconómicos, control óptimo, programación dinámica.

Códigos JEL: Q2, Q22, Q57 y C61.

Abstract

Three models are developed to analyze fishing of the carachi species in Lake Titicaca (Peru-Bolivia). Using the Bioeconomic Model, in the stationary state, the reference points are found for the maximum sustainable return (MSR), the maximum economic return (MER) and free access (FA). The average current extraction rate (X) and the human effort involved (E) in exploiting this resource are 2,216 tons per annum and 8,857 fishermen respectively. These are higher than the optimal values for the MER (1,599 tons per annum and 3,016

fishermen) in maintaining a biomass of 19,207 tons. The dynamic model based on the optimal control theory indicates that the levels of the stationary state are sensitive to changes in the price and unit extraction cost parameters. Using the dynamic programming model, optimal values are estimated for different levels of available stock, stable over the long term, that oscillate between 1,160 and 2,320 tons.

Keywords: artisan fishing, bioeconomic models, optimal control, dynamic programming.

JEL codes: Q2, Q22, Q57 and C61.

E-mail de los autores:

gcalsin@yahoo.com, rrosales@uniandes.edu.co, apazaedson@yahoo.com

INTRODUCCIÓN

El presente estudio tiene como objetivo realizar un análisis de optimización y simulación dinámica de la explotación del recurso carachi (*Orestias agassii*) para el manejo sostenible de la pesca en el lago Titicaca (Perú–Bolivia). Para ello, se aborda el análisis desde las perspectivas de un modelo bioeconómico y un análisis dinámico. El primero se desarrolla con los modelos biológico-económicos de Gordon-Schaefer (de 1954) y el segundo, con la aplicación de la teoría de control óptimo y programación dinámica¹, que se basa en el principio de optimalidad de Bellman (Aliaga, Gómez y Neira 2001; Seijo, Defeo y Salas 1997; Miranda y Fackler 2002).

El agotamiento de los recursos pesqueros en el lago Titicaca muestra que la pesca ha sido excesiva y ha contribuido a cambios en el ecosistema íctico. Estudios relacionados con la biomasa pesquera en el lago durante los últimos años indican una disminución significativa de las especies nativas (Dirección Regional de Pesquería [Direpe] – Puno 2004). La pesca en el lago Titicaca es una actividad importante para las comunidades altiplánicas andinas, por ser generadora de ingresos complementarios a los obtenidos en la agricultura y la ganadería. Las pesquerías artesanales han contribuido a la degradación de los recursos ícticos al introducir especies exóticas y extraer cantidades no permisibles en períodos de reproducción, lo que ha sometido a los stocks de estas poblaciones a un impacto no sostenible en el largo plazo (Dejoux e Ittis 1991; Blázquez y Sáez 2005).

La recuperación de peces nativos en peligro de extinción es una de las líneas importantes de investigación, principalmente para las siguientes autoridades: Proyecto Especial Binacional Lago Titicaca (PELT), Autoridad Binacional Lago Titicaca (ALT), Dirección Regional de Pesca (Direpe–Puno), Unidad de Pesca y Acuicultura en Bolivia, y Autoridad Binacional Autónoma del Sistema Hídrico Titicaca – Desaguadero – Poopó – Salar de Coipasa (TDPS), y debe ser complementada con programas de fortalecimiento institucional y capacitación a los pescadores artesanales, de manera que contribuya y facilite la tarea de recuperación de especies ícticas nativas como el mauri, el carachi y el ispi, en completa armonía con la pesca de especies introducidas como el pejerrey y la trucha (Ministerio de Asuntos Campesinos y Agropecuarios [MACA] 2005, Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA] 1996).

La carencia de estudios bioeconómicos e investigaciones relacionadas con la recuperación de especies nativas dificulta la aplicación de medidas de política para mantener el recurso

1. El modelo será resuelto usando el paquete computacional MatLab, por medio de programación dinámica determinística. Este modelo se basa en el paquete computacional Compecon de Miranda y Fackler (2002), que combina el uso de métodos analíticos, numéricos, computacionales y lenguajes de programación.

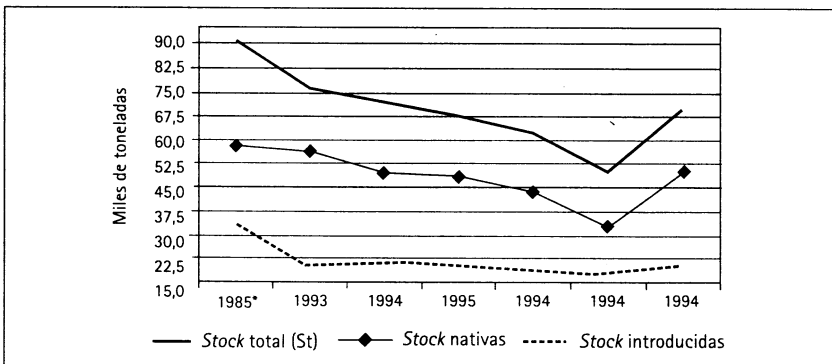
pesquero sostenible. El objetivo general del presente estudio consiste en suministrar elementos que contribuyan a la formulación de una política para el manejo sostenible de la pesca de la especie carachi en el lago Titicaca. Los objetivos específicos del estudio son: a) analizar bioeconómicamente la pesquería del carachi por medio del modelo Gordon-Schaefer; b) estimar las sendas de *stock*, extracción y esfuerzo óptimos mediante la teoría de control óptimo; c) realizar simulaciones en precios y costos unitarios y analizar sus efectos en los niveles de *stock*, extracción y esfuerzo; y d) estimar las políticas óptimas de extracción pesquera sobre la base de la programación dinámica y realizar un análisis post-optimalidad del recurso pesquero carachi en el lago Titicaca.

1. ANTECEDENTES

El lago Titicaca ha sido clasificado como de alta prioridad regional para la conservación de ecosistemas de agua dulce. Existen convenios de cooperación entre el Perú y Bolivia para la conservación de la biodiversidad, en los que se formula el aprovechamiento integral de los recursos ícticos nativos (PNUMA 1996, Gaita 2002). La *Orestias agassii* (carachi) es una especie endémica y de alta importancia comercial para la región altiplánica; es fuente importante de ingresos para las comunidades tradicionales, por lo que su estructura productiva es complementaria a la actividad agropecuaria; y el potencial que muestran los recursos hidrobiológicos conduce a afirmar que esta actividad es una alternativa viable y segura para lograr producciones con menor riesgo e incertidumbre que las agropecuarias; sin embargo, la captura pesquera es artesanal y no controlada, lo que conlleva la sobrepesca de las especies nativas y, por ende, la disminución de la biomasa o *stock* poblacional (Centro de Investigación de Recursos Naturales y Medio Ambiente [CIRNMA] y Centro de Desarrollo Agrario y Forestal [Cedafor] 2001).

Gráfico 1

Evolución de la biomasa de especies nativas e introducidas en el lago Titicaca (1985–2000)



Fuente: Instituto del Mar del Perú y Proyecto Especial Binacional Lago Titicaca.

La actividad pesquera se da en su mayor proporción en la zona litoral del lago; por aquellos pobladores asentados en sus riberas, quienes extraen los recursos ícticos para autoconsumo y comercio. En toda la zona litoral del lago habitan aproximadamente 359.820 personas, cuyas principales actividades económicas son la agricultura, la ganadería y la pesca. El número total de pescadores artesanales registrados es de alrededor de 7.200 en la zona peruana y alrededor de 3.500 en la zona boliviana. Cabe destacar que la capacidad de las embarcaciones se encuentra entre los 100 y 500 kilogramos según el tipo: balsas de totora (47%), botes de madera con vela y remo (40%), botes con motor fuera de borda (12%) o chalanas (1%) (Direpe-Puno 2004; MACA 2005; Azurín 2005; Dejoux e Iltis 1991; Autoridad Binacional del Lago Titicaca [ALT] 2002).

La pesca en su mayoría se rige por características de libre acceso y tiende a «la tragedia de los comunes» como lo explica Hardin (1968), lo que significa que cada agente busca maximizar sus beneficios sin tener en cuenta el impacto de la extracción del recurso sobre el stock o población total del mismo, lo que hace que este no sea sostenible y que, por tanto, surja la necesidad de implementar políticas adecuadas para administrar un recurso bajo asignación de derechos de propiedad. Los estudios pesqueros que permiten analizar la dinámica poblacional junto con objetivos económico-sociales se denominan «modelos bioeconómicos»; y desde esta perspectiva se puede hallar puntos referenciales para la gestión de pesquerías. Aliaga, Gómez y Neira (2001) analizan la pesquería de la sardina y la anchoveta; Amaya (2003) desarrolla un modelo bioeconómico para la pesquería de atún aleta amarilla y encuentra que la pesquería de atún en Colombia posee aún incentivos para el ingreso de flotas pesqueras; Jaramillo (2005) estudia la pesquería de bagres mediante los modelos de Schaefer, Fox y Umbral, con el objetivo de proveer políticas de captura sin afectar la población del recurso.

En otros estudios se considera el componente temporal en el modelo, lo que permite realizar análisis más profundos en condiciones de optimalidad de la gestión pesquera. Así, las decisiones de inversión en el esfuerzo están relacionadas con la obtención de ingresos netos positivos. La importancia del tiempo como factor clave de inversión y desarrollo de la actividad considera las preferencias por el consumo de un bien en diferentes períodos. Bjorndal y Conrad (1987) modelan dinámicamente la pesquería de arenque en Noruega haciendo uso de la optimización dinámica en tiempo discreto y evalúan los óptimos de embarcaciones y biomasa bajo la hipótesis de sostenibilidad del recurso en el tiempo. Borbón (2003) aplica este enfoque para la anchoveta norteña por medio de la teoría de control óptimo determinista basada en la ecuación de Gompertz-Fox, y concluye que el nivel máximo de esfuerzo ejercido es sub-óptimo para la captura de la anchoveta y que, por

ende, este recurso está siendo sub-explotado. Groenbaek (2004) analiza la explotación del bacalao, para lo cual aplica también la optimización dinámica en tiempo discreto, evaluada en una pesquería de libre acceso, y concluye que la pesquería pasó por dos etapas diferentes; por tanto, realiza en un principio un análisis bioeconómico para ambos intervalos y, posteriormente, aplica la optimización para todo el período de estudio, con lo que llega a resultados dinámicos estables de la captura y biomasa óptimas.

Para el caso de la pesquería de carachi, se han realizado investigaciones relacionadas con la importancia de conservación de las especies ícticas en programas de recuperación y conservación; sin embargo, no se ha realizado un análisis exhaustivo de la situación pesquera desde el punto de vista socioeconómico. De ahí la relevancia de realizar un análisis bioeconómico y dinámico que permita determinar recomendaciones sobre los niveles adecuados de explotación de carachi a lo largo del tiempo en el lago Titicaca.

2. CAPTURA DE ESPECIES NATIVAS EN EL LAGO TITICACA

La captura de especies nativas en el lago Titicaca se realiza con varios tipos de artes de pesca y para la especie *Orestias* se utilizan las redes agalleras, con una captura anual de entre 1.900 y 2.216 toneladas de carachi. La extracción de estas especies sigue un sistema de jornada pasiva y el mejor horario de pesca es el nocturno. Aunque las capturas no se dan en grandes proporciones, se han registrado niveles de biomasa muy bajos en los últimos períodos.

La comercialización de las especies capturadas tiene gran demanda en el mercado regional²: estas se expenden casi a diario a los consumidores (Blázquez y Sáez 2005; Dejoux e Iltis 1991). Las especies ícticas más importantes con valor comercial son las especies nativas: *Orestias agassii* (carachi), *Orestias luteous* (punku), *Orestias ispi* (ispi) y *Trichomycterus dispar* (mauri); y las especies introducidas: *Basilichthys bonariensis* (pejerrey) y *Onkorhynchus mykiss* (trucha). De estas, la *Orestias agassii* es una de las especies nativas más representativas del lago: durante la etapa de alevinaje habita en las zonas someras del litoral, es decir, en lugares de vegetación acuática abundante, y posteriormente emigra hacia aguas más profundas según el crecimiento de la especie (Direpe-Puno 2004).

2. Cabe señalar que en las comunidades la extracción es tanto para autoconsumo como para comercialización; esta última tiene dos tipos de intercambio: directo (trueque) e indirecto (mercantil).

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Modelo bioeconómico para la pesquería en el lago Titicaca

3.1.1 Modelo biológico-económico de Gordon-Schaefer

El modelo biológico de Schaefer permite predecir la biomasa remanente del stock (S) como resultado de la captura (X) sin considerar factores y variables como la estructura, la edad, el crecimiento individual, el reclutamiento u otra vulnerabilidad (Hilborn y Walters 1992; Fréon y Yáñez 1995; Seijo, Defeo y Salas 1997; Seinfeld, Cuzquen, Farje y Saldívar 1998; Quiroga 2000; Wiff y Quiñones 2004). El modelo biológico de Schaefer puede expresarse mediante una curva logística, que muestra la dinámica de la población de peces en el tiempo y se representa por medio de la siguiente ecuación:

$$S_{t+1} = S_t + rS_t \left(1 - \frac{r}{k} S_t \right) - X_t ; \quad F(S_t) = rS_t \left(1 - \frac{r}{k} S_t \right) \quad (1)$$

La ecuación (1) muestra el estado del stock del recurso para el período ($t+1$) en función del stock actual (S_t), adicionando la función de crecimiento del recurso $F(S_t)$ menos el nivel de capturas (X_t) en el tiempo t . Asimismo, r es la tasa intrínseca de crecimiento³ y k es la capacidad de carga del ecosistema.

$$X_t = qE_t S_t \quad (2)$$

En la ecuación (2) se asume proporcionalidad entre la biomasa S_t y el nivel de esfuerzo de pesca E_t mediante el coeficiente de capturabilidad q . Además bajo el supuesto de que la captura remueve solo el excedente productivo ($S_{t+1} = S_t$) y combinando (1) y (2), se obtiene la curva de rendimiento-esfuerzo, de tal manera que el modelo se reduce a:

$$X_t = q \cdot k \cdot E_t - \left(\frac{k}{r} \right) \cdot q^2 \cdot E_t^2 \quad (3)$$

Los supuestos que se consideran en el modelo son (Hilborn y Walters 1992; Seijo *et al.* 1997): a) el recurso está en un ecosistema estable; b) el recurso pesquero lo compone solo una especie; c) la captura la realiza un grupo de pescadores que utilizan un solo arte de pesca y que, por ello, aplican su esfuerzo únicamente a esta especie; y d) la captura

3. Es un valor que cuantifica el crecimiento de una población entre períodos de tiempo sucesivos; se estima con frecuencia en modelos de producción que permiten evaluar los niveles sostenibles de captura.

por unidad de esfuerzo (CPUE) es directamente proporcional a la abundancia del *stock*
 $CPUE = (X/E) = q * St.$

Sin embargo, en el modelo de Gordon se incorpora el componente económico con base en la curva de rendimiento–esfuerzo sostenible basada en la ecuación (3). Gordon establece que los beneficios de una pesquería (π) están dados por la diferencia de los ingresos totales sostenibles⁴ (ITS) y los costos totales (CT), como:

$$\pi = ITS - CT = p * X(E)_t - wE_t$$

Donde: p es el precio de la captura unitaria y w es el costo unitario del esfuerzo. Combinando los modelos de Gordon y Schaefer se determinan los equilibrios desde el punto de vista del máximo rendimiento sostenible⁵ (MRS), el máximo rendimiento económico (MRE) y el libre acceso (LA), como se muestra en el cuadro 1.

Cuadro 1

Formulación de los puntos de referencia bioeconómicos para la gestión de la pesquería en el lago Titicaca

Parámetros (estados estacionarios de equilibrio)	Ecuación
Nivel de esfuerzo en el máximo rendimiento sostenible	$E_{MRS} = r/2q$
Nivel de extracción en el máximo rendimiento sostenible	$X_{MRS} = kr/4$
Nivel de biomasa o <i>stock</i> en el máximo rendimiento sostenible	$S_{MRS} = k/2$
Nivel de esfuerzo en el máximo rendimiento económico	$E_{MRE} = (r/2q) - (wr/2p kq^2)$
Nivel de extracción en el máximo rendimiento económico	$X_{MRE} = [(pqk+w)*X_{LA}]/4w$
Nivel de biomasa o <i>stock</i> en el máximo rendimiento económico	$S_{MRE} = (1-(q/r)E)k$
Nivel de esfuerzo bioeconómico o libre acceso (ITS=CT)	$E_{LA} = (r/q) - (wr/pkq^2)$
Nivel de extracción bioeconómico o de libre acceso	$X_{LA} = qE_{LA}S_{LA}$
Nivel de biomasa o <i>stock</i> bioeconómico o de libre acceso	$S_{LA} = w/pq$

Fuente: elaboración propia.

- La curva de ingresos sostenibles en función del esfuerzo se comportará de la misma manera que la de rendimiento–esfuerzo de Schaefer, solo que en términos monetarios (Seijo *et al.* 1997).
- Es la media máxima de rendimiento o captura compatible con el equilibrio sustentable de la población a largo plazo. Se denomina también «óptimo biológico» porque no considera los aspectos económicos y sociales (Pearce y Turner 1995).

3.2 Modelos dinámicos

3.2.1 Modelo dinámico de control óptimo

Considerar el componente temporal en el modelo lleva a realizar un análisis más profundo de las condiciones de optimalidad en la gestión pesquera. En este caso no se establece una situación de equilibrio a largo plazo, sino el ajuste dinámico de las variables biológicas y económicas.

El modelo de referencia es el desarrollado por Clark y Munro (1975), a partir del cual se plantea un modelo de planificador central o social que busca controlar el tamaño de la población (variable de estado) por medio de la limitación en las capturas (variable de control), de forma que se maximice el valor presente de un flujo de ingresos netos en un determinado horizonte temporal, que se supone infinito. Este se formula en los siguientes términos (Varela y Garza 2002):

$$\text{Max}_{h(t)} \int_0^{\infty} e^{-\delta t} [p \cdot X(S(t), E(t)) - wE(t)] dt \quad (5)$$

s. a.

$$\frac{dS}{dt} = F(S) - X(t)$$

$$0 \leq X(t) \leq X_{\text{máx}}$$

$$S(t) \geq 0$$

Donde: p , w y σ denotan el precio unitario del pescado, costos unitarios de extracción y la tasa social de descuento, respectivamente. $X(t)$ representa las capturas (dependiente del nivel de biomasa $S(t)$ y el esfuerzo $E(t)$ en el instante (t) , y (dS/dt) representa la dinámica de la población de peces.

A partir de la ecuación (5), se trata de determinar hasta qué punto le interesa a la sociedad invertir en el recurso y cuál es el nivel apropiado de capturas en cada instante del tiempo. De tal manera que se busca maximizar el valor del hamiltoniano en cada instante del tiempo⁶. El hamiltoniano del problema (5) viene dado por la siguiente expresión:

$$H(S(t), X(t), t, \lambda(t)) = e^{-\delta t} [p - w(S)] X(t) + \lambda(t) [F(S) - X(t)] \quad (6)$$

6. Dado que el hamiltoniano es lineal con respecto a la variable de control ($X(t)$), el problema de control óptimo también lo es; por tanto, las condiciones de Pontryagin son necesarias y suficientes para la existencia de un óptimo.

En donde $\lambda(t)$ representa el precio sombra o valor social del recurso en el instante t . Esta variable refleja el efecto de una variación del *stock* o biomasa sobre las ganancias futuras, es decir, el incremento (pérdida) en dichas ganancias si el recurso pesquero aumenta (disminuye) en una unidad. De las condiciones de primer orden $\partial H / \partial X \gamma \partial \lambda(t) / \partial t$ se obtiene la siguiente expresión para la trayectoria de S^* , suponiendo que se extrae todo lo que crece ($X^*=F(S^*)$):

$$F'(S^*) - \frac{w'(S^*) \cdot F(S^*)}{\rho - w(S^*)} = \delta \quad (7)$$

La expresión (7) afirma que el nivel óptimo del recurso (S^*) es aquel en el que la propia tasa de interés del recurso se iguala a la tasa social de descuento (δ). La expresión se divide en dos componentes, donde $F'(S^*)$ es la tasa marginal del crecimiento del recurso y la otra expresión es una medida del impacto de la densidad del *stock* sobre los beneficios marginales sostenibles. Asimismo, la ecuación (7) determina la senda óptima para el recurso, y a partir de ella se obtiene el nivel de capturas compatible con la sostenibilidad del *stock* de poblaciones. Para obtener los resultados analíticos óptimos se utilizan métodos numéricos sobre la base de los siguientes puntos óptimos de *stock*, extracción y esfuerzo:

$$S^* = \frac{k}{4} \left[\left(1 + \frac{w}{pqk} - \frac{\delta}{r} \right) + \sqrt{\left(1 + \frac{w}{pqk} - \frac{\delta}{r} \right)^2 + \frac{8w\delta}{pqkr}} \right] \quad (8)$$

$$X^* = \frac{1}{w} \cdot \left\{ S^* (pqS^* \cdot w) \left[\delta - r \left(1 - \frac{2S^*}{k} \right) \right] \right\} \quad (9)$$

$$E^* = X^* / qS^* \quad (10)$$

3.2.2 Modelo de programación dinámica (PD)

La formulación básica es similar a la de control óptimo dado que también busca maximizar el bienestar de todos los individuos y está sujeta a la dinámica del crecimiento poblacional en un horizonte de tiempo infinito. La teoría de control óptimo y el modelo de programación dinámica son dos aproximaciones que arriban a soluciones en el análisis de distintas áreas de estudio. Las diferencias entre estas dos aproximaciones son: a) la teoría de control conduce a expresiones de sendas en el tiempo de las variables $S(t)$, $X(t)$ y $\lambda(t)$; y b) la programación dinámica conduce a expresiones para la variable de control y la función valor como funciones del tiempo y estado del recurso, lo cual conduce a reglas de decisión en lugar de sendas en el

tiempo. Para problemas de naturaleza determinística, la programación dinámica involucra soluciones parciales de la ecuación diferencial que tiende a presentar más cambios que las ecuaciones diferenciales ordinarias (Miranda y Fackler 2002; Oviedo 2005).

En el modelo, el estado del recurso en un período siguiente depende del estado y la decisión actual; tal modelo de decisión se denomina «modelo de decisión de Markov». Basado en Miranda y Fackler (2002), el problema de Markov con variables de estado y de control continuas en tiempo discreto puede ser analizado usando métodos de programación dinámica, teniendo en cuenta el principio de optimalidad de Bellman⁷. Este principio de optimalidad está expresado formalmente en la ecuación de Bellman, donde el valor asociado a la variable de estado en cada período es igual al máximo de los beneficios presentes más el valor descontado del valor esperado de los beneficios en el período siguiente; asimismo, la ecuación de Bellman es una relación recursiva fundamental que se traduce en la siguiente expresión:

$$V(s) = \max_{x \in X} \{f(s, x) + \delta E_{\epsilon} V(g(s, x, \epsilon))\}, s \in S \quad (11)$$

En esta ecuación se resume el problema que enfrentan los individuos de las comunidades pesqueras, es decir, el balance óptimo de una recompensa inmediata frente a una recompensa futura esperada. Para la solución de la ecuación de Bellman, se aplican métodos numéricos computacionales, como es el caso del método de aproximación lineal cuadrática⁸ y el método de colocación (Miranda y Fackler 2002).

Modelo analítico del recurso carachi

En el caso de la explotación del carachi (*Orestias agassii*), se busca maximizar el beneficio de la explotación del recurso y, por ende, el bienestar de la sociedad; el horizonte de tiempo es infinito; su naturaleza es determinística; la variable de estado es S (stock de población en toneladas) y su espacio es $S \in [0, \infty]$; y la variable de control es X (extracción o captura en toneladas), donde $X \in [0, S]$. El modelo se expresa de la siguiente manera:

$$\text{Max}_{x \in X(s)} \sum_{t=0}^{\infty} \rho^t f(s, x) \quad (12)$$

$$\text{s.a. } g(s, x) = s_{t+1} = s_t - x_t + F(s_t - x_t)$$

-
7. Indica que una política óptima tiene la propiedad de que, cualesquiera sean el estado y las decisiones iniciales tomadas (control), las decisiones restantes deben constituir una política óptima con independencia del estado resultante de la primera decisión.
 8. Este método utiliza aproximaciones de series de Taylor que precisan el estado estacionario, principalmente si surgen resultados a partir de una función lineal de transición en la variable de estado (s) (Miranda y Fackler 2002).

Por medio de la optimización dinámica de Bellman se resuelve la función indirecta $V(s)$, que se define como el valor máximo que puede alcanzar la función objetivo una vez seleccionada de manera óptima la variable de control, desde el momento t hasta el final del problema y partiendo del estado inicial s . La función valor se representa por:

$$V(s) = \max_{x \in X(s)} \{ f(s, x) + \delta E_{\epsilon} V(g(s, x)) \}$$

Donde: s es el *stock* disponible, x es la captura del recurso, f es la función de recompensa de las comunidades pesqueras, g es la función de transición del *stock* del recurso, F es la función de crecimiento del *stock* del recurso y V es la función valor del *stock* (s) del recurso.

La función de recompensa está dada por la diferencia de ingresos y costos. Para capturar los ingresos se tiene en cuenta una función de demanda que refleja el beneficio marginal por consumir; esta se representa por medio de una función lineal inversa de la demanda del carachi⁹ como: $\log(p) = \tau_0 - \tau_1 \log(\phi)$, donde p es el precio por kg y τ_0 y τ_1 son los parámetros de la función. Simplificando la expresión de la función inversa de demanda¹⁰ se tiene: $p = \gamma_0 \phi^{-\gamma_1}$ y la función de costos por $c x$. Por tanto, la función de recompensa $f(x)$ estará representada por:

$$f(x) = \int_0^x \gamma_0 \phi^{-\gamma_1} \partial \phi - c^* x, \text{ por lo tanto, } f(x) = \gamma_0 \frac{x^{(1-\gamma_1)}}{(1-\gamma_1)} - c^* x \quad (14)$$

Asimismo, se requiere información de la tasa intrínseca de crecimiento (r), y la capacidad de carga (k), las cuales se obtienen del análisis bioeconómico. Por tanto, la función de transición está dada por:

$$g(s, x) = s_{t+1} = \alpha(s_t - x_t) - 0,5\beta(s_t - x_t)^2 \quad (15)$$

Por tanto, la ecuación de Bellman para la pesquería en el lago Titicaca está dada por:

$$V(s) = \max_x \left\{ \gamma_0 \frac{x^{(1-\gamma_1)}}{(1-\gamma_1)} - c^* x + \delta.V(\alpha(s-x) - 0,5\beta(s-x)^2) \right\} \quad (16)$$

9. Para hallar la función inversa de demanda se parte de la estimación econométrica, utilizando la información de la evolución del precio y la captura en el periodo 1990-2004, y para el caso del costo c se asume que es proporcional a la cantidad extraída.

10. Donde $\gamma_0 = e^{\tau_0}$ y $\gamma_1 = \tau_1$.

De (16) se derivan las siguientes condiciones:

$$\frac{dV(s)}{dx} = \gamma_0 x^{-\gamma_1} - cx + \delta\lambda_{t+1}(-\alpha + \beta(s-x)) = 0 \quad (17)$$

$$\frac{dV(s)}{d\lambda} = \lambda_t = \delta\lambda_{t+1}(\alpha - \beta(s-x)) \quad (18)$$

Dadas las condiciones de Euler, se tiene las expresiones que permiten estimar el *stock* (s^*), la extracción (x^*) y el precio sombra (λ^*) en estado estacionario, representadas por:

$$(x^*)^{-\gamma_1} = (c + \delta\lambda^*(\alpha - (s^* - x^*))) / \gamma_0 \quad (19)$$

$$\lambda^* = \delta\lambda^*(\alpha - \beta(s^* - x^*))$$

$$s^* = \alpha(s^* - x^*) - 0,5\beta(s^* - x^*)^2$$

4. FUENTES DE INFORMACIÓN

La información estadística comprende el período 1990-2004 y se obtuvo de varias fuentes. Los datos de la biomasa de los peces nativos, en especial el carachi, se obtuvieron de los cruceros de evaluación hidroacústica, información proporcionada por el Instituto del Mar del Perú (Imarpe) y el Proyecto Especial Binacional Lago Titicaca (PELT). Según el Imarpe, en el período 1985-2000 se tuvo un promedio de 50.790 toneladas de biomasa de especies nativas (entre ellas carachi, ispi, mauri y boga) y de ese promedio 10.348 toneladas correspondían al recurso carachi. Se estima que la biomasa nativa pelágica se encuentra entre los límites de 80.180 a 87.754 toneladas, e incluso que esta podría elevarse a un valor de 124.000 toneladas de peces como capacidad de carga (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD] y Autoridad Binacional del Lago Titicaca [ALT] 2002; Dejoux e Iltis 1991). Para los datos de captura se cuenta con información mensual y anual desde 1990 hasta 2004, la cual fue proporcionada por la Dirección Regional de Pesquería de Puno (Direpe-Puno) y el PELT. La información de captura de especies nativas en Bolivia se obtuvo de la Unidad de Pesca y Acuicultura del Ministerio de Asuntos Campesinos y Agropecuarios (MACA), basada a su vez en varios informes y diagnósticos pesqueros publicados. Así, el promedio anual de extracción o captura del carachi en el período 1990-2004, en el lado peruano, es de 1.343 toneladas y en el caso de Bolivia, se tiene un aproximado de 873 toneladas anuales, con un promedio total de 2.216 toneladas de extracción anual de carachi en el lago Titicaca (PNUMA 1986; ALT y PNUD 2001; Direpe-Puno 2004). Los precios del recurso se obtuvieron en el mercado (Direpe-Puno 2004). Adicionalmente, se cuenta con información del número promedio de pescadores en ambas zonas (Perú y Bolivia).

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En esta sección se considera primero las estimaciones del modelo Gordon-Schaefer y luego se analiza la pesquería sobre la base de modelos dinámicos mediante la teoría de control óptimo y programación dinámica basada en el paquete Compecon de Miranda y Fackler (2002).

5.1 Modelo bioeconómico de la pesquería en el lago Titicaca

Con los criterios básicos para que el recurso sea sostenible biológicamente, se estimó a través de MCO¹¹ la ecuación (1) del modelo de Schaefer para obtener los valores de la tasa intrínseca de crecimiento $r = 0,29068$ y la capacidad de carga del ecosistema $k = 26.915$ toneladas para el recurso carachi¹². De la misma manera, a partir de datos de captura por unidad de esfuerzo (CPUE) y biomasa se estimó el coeficiente de capturabilidad q por MCO, cuyo valor fue de 0,0000276. Con los valores de r , k y q estimados econométricamente, se construyó la función de producción-esfuerzo representada por la ecuación (3) como:

$$X_t = 0,743E - 7,05 * 10^{-5} E^2$$

Esta ecuación permite hallar el comportamiento de la función producción-esfuerzo en el largo plazo para obtener los niveles de captura y esfuerzo óptimos en el estado estacionario, la misma que se muestra en el anexo 1. Adicionalmente, se consideran las estimaciones anteriores para analizar el modelo compuesto de Gordon-Schaefer y así determinar los valores de equilibrio estacionario para la gestión pesquera desde el punto de vista del máximo rendimiento económico (MRE) y del libre acceso (LA). En el cuadro 2 se presentan los valores de los niveles de esfuerzo, extracción y *stock* óptimos entre rangos de límites superiores (LS) e inferiores (LI). Desde el punto de vista del MRS, es decir, aquellos puntos que indican compatibilidad con el equilibrio sustentable de la población en el largo plazo, se determinó que para una capacidad de carga de 26.915 t, debe extraerse óptimamente entre 1.760 y 2.151 t, con un número de pescadores de 4.739 y 5.793 para mantener una biomasa que oscila entre 12.112 y 14.803 t de carachi. Asimismo, en el MRE donde se maximizan los beneficios obtenidos por el uso del recurso pesca, se estimó un nivel de extracción óptimo de entre 1.439 y 1.759 t, una cantidad óptima de entre 2.714 y 3.318 pescadores y mantener una biomasa que oscila entre 17.287 y 21.128 t del recurso carachi.

11. Mínimos cuadrados ordinarios.

12. A partir de estos parámetros se graficó el comportamiento de la tasa de crecimiento o capturas en función de la biomasa; allí se observan los rangos de los niveles óptimos de captura y biomasa bajo el criterio de MRS (anexo 2).

Para el caso del libre acceso (LA), uno de los principales resultados fue afirmar que los niveles de esfuerzo de pesca tienden a un equilibrio biológico en el que el ingreso total iguala a los costos totales, es decir, que los beneficios económicos en el tiempo llegan a disiparse con la entrada de nuevos pescadores. Los límites estimados de extracción de captura se encuentran en un rango de 1.723 a 2.106 t, con un nivel esfuerzo pesquero que oscila entre 5.429 y 6.635 pescadores. De acuerdo con estos valores, el carachi estaría siendo sobreexplotado en el lago Titicaca y cabe la necesidad de tomar medidas de regulación para que el recurso no llegue a extinguirse.

Cuadro 2

Puntos de referencia bioeconómicos de interés de la pesquería del carachi (*Orestias agassii*) en el lago Titicaca

Variables	Estimación de los rangos		
	MRS (LI)	MRS	MRS(LS)
Máximo rendimiento sostenible (MRS)	MRS (LI)	MRS	MRS(LS)
Extracción o captura (t)	1.760	1.956	2.151
Nivel de esfuerzo (número de pescadores)	4.739	5.266	5.793
Nivel de biomasa o stock (t)	12.112	13.457	14.803
Máximo rendimiento económico (MRE)	MRE(LI)	MRE	MRE(LS)
Extracción o captura (t)	1.439	1.599	1.759
Nivel de esfuerzo (número de pescadores)	2.714	3.016	3.318
Nivel de biomasa o stock (t)	17.287	19.207	21.128
Libre acceso (LA)	LA(LI)	LA	LA(LS)
Extracción o captura (t)	1.723	1.915	2.106
Nivel de esfuerzo (número de pescadores)	5.429	6.032	6.635
Nivel de biomasa o stock (t)	10.350	11.500	12.650

LI = límite inferior; LS = límite superior.

Fuente: elaboración propia.

5.2 Modelos dinámicos

5.2.1 Modelo dinámico de control óptimo

Para este caso se estimaron las cantidades óptimas de pescado por capturarse considerando las restricciones de tipo biológico y la influencia del tiempo reflejada en los factores de descuento. El problema de control óptimo se basó en los parámetros estimados en el modelo de Gordon-Schaefer con el propósito de ilustrar el efecto que tiene la tasa de descuento en los niveles de stock (S^*) y extracción (X^*), y el esfuerzo (E^*) de equilibrio bioeconómico en la explotación del recurso pesquero del carachi (cuadro 3). El *statu quo* o «línea base»

corresponde al precio promedio actual por kilogramo de carachi en el mercado, equivalente a S/. 2,30¹³, y el costo unitario de extracción por cada kilogramo de carachi, que oscilaría entre S/. 0,73 y S/. 1,00¹⁴ (ALT y PNUD 2001; Direpe-Puno 2004; Azurín 2005). Asimismo, se observa que a una tasa de descuento de cero ($\delta=0$) se tiene los mismos niveles del MRE presentados anteriormente¹⁵, y que tasas con tendencia al infinito ($\delta=\infty$) implican resultados que convergen al LA¹⁶.

En el cuadro 3 se ha considerado tasas de descuento que varían de 0 a 60%, de las cuales se concluye que a medida que se incrementa la tasa, manteniendo constantes el precio y el costo unitario de extracción, los niveles de extracción se incrementan de 1.599 t a 1.952 t, lo que implica que los ingresos se valoran más en el presente; en cuanto al esfuerzo pesquero, este aumenta de 3.016 a 5.017 pescadores artesanales. Por ende, tasas crecientes de descuento afectan de manera inversa al nivel de *stock* y de manera directa a los niveles de extracción y de esfuerzo pesquero. Sobre la base del escenario de *statu quo*, se realizan simulaciones en los parámetros de precios y costos unitarios con el propósito de observar los cambios en las variables de estudio para la pesquería del carachi.

Cuadro 3
Resultados de niveles óptimos de población (*stock*), extracción y esfuerzo para el carachi en el lago Titicaca

Tasa de descuento (%)	Stock (toneladas)	Extracción (toneladas)	Esfuerzo (número de pescadores)
Δ	S*	X*	E*
0	19.207	1.599	3.016
1	19.024	1.621	3.088
5	18.344	1.698	3.354
10	17.602	1.770	3.644
20	16.429	1.861	4.103
30	15.574	1.908	4.438
50	14.464	1.945	4.872
60	14.094	1.952	5.017

Fuente: elaboración propia.

13. Tipo de cambio US\$ 1 = S/. 3,30. En este caso equivale a US\$ 0,70 por kilogramo de carachi.

14. Cabe señalar que este rango hace referencia a los pescadores artesanales que no cuentan con equipos tecnificados y cuya capacidad de embarque máximo no sobrepasa los 100 kg; asimismo, este costo equivale a entre US\$ 0,22 y US\$ 0,30.

15. Lo que implica que a este nivel el óptimo no está en función del tiempo, sino en estado estacionario en el largo plazo.

16. Para la aplicación no se considera esta tendencia de la tasa, por ser análoga.

En el siguiente cuadro se presentan las simulaciones de los precios y costos. Tales estimaciones se encuentran en unidades monetarias y porcentuales con el propósito de graficar las sendas de comportamiento y hacer el análisis de las elasticidades respectivas.

Cuadro 4
Simulación de los parámetros de precio unitario y costo unitario de extracción

Precio (S./kg)	1,61	2,07	2,3	2,53	2,99	3,45
Variación porcentual (%)	-30	-10	0	10	30	50
Costo unitario por esfuerzo (S./kg)	0,66	0,73	0,8	0,95	1,1	1,46
Variación porcentual (%)	-10	0	10	30	50	100

Fuente: elaboración propia.

Las simulaciones muestran el efecto de los cambios en el precio y el costo unitario en las variables de extracción. La situación de precios altos podría conllevar mayores niveles de extracción del recurso, de manera que afectaría los niveles de población o *stock* del mismo en el largo plazo. En el gráfico 2, a partir de las elasticidades, si el precio de *statu quo* disminuye en 10% y 30%, los niveles de extracción disminuyen en promedio en 19,5% y 3,7%, respectivamente; sin embargo, ante incrementos del precio en 10%, 30% y 50%, los niveles de extracción se incrementan en 2,3%, 4,4% y 4,8%, respectivamente.

Gráfico 2
Senda óptima de extracción (x^*) ante variaciones del precio a diferentes tasas de descuento

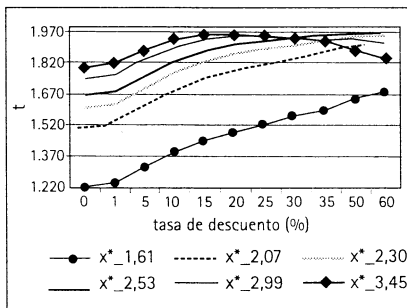
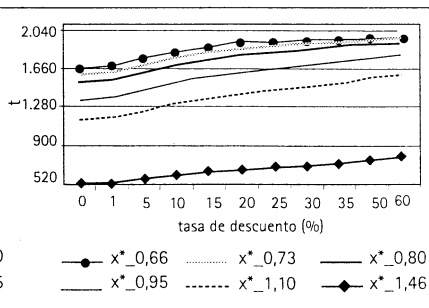


Gráfico 3
Senda óptima de extracción (x^*) ante variaciones en el costo unitario a diferentes tasas de descuento



Fuente: elaboración propia.

En el gráfico 3 se observan los diversos niveles de extracción ante variaciones del costo unitario manteniendo constante el precio a diferentes tasas de descuento. Si el costo unitario de *statu quo* disminuye en 10%, los niveles de extracción se incrementan en promedio 2,5%; sin embargo, incrementos del costo en 10, 30, 50 y 100% afectan la extracción de manera inversa en 3,3, 12,3, 24,0 y 64,3%, respectivamente. Como corres-

ponde, las variaciones en los niveles de extracción son sensibles ante cambios en el costo unitario, lo que refleja la situación actual de los pescadores de las comunidades que habitan en el lago Titicaca.

Los gráficos 4 y 5 muestran los niveles de *stock* a diferentes tasas de descuento ante variaciones del precio y el costo unitario de extracción, respectivamente¹⁷. El mayor nivel de biomasa o *stock* se obtiene cuando la tasa de descuento es cero, nivel de *stock* similar a la del MRE cuando el precio y el costo se mantienen constantes. Si el precio aumenta, los niveles de *stock* a diferentes tasas de descuento disminuyen convergiendo a los niveles de LA.

Gráfico 4
Senda óptima del *stock* (S^*) ante variaciones del precio a diferentes tasas de descuento

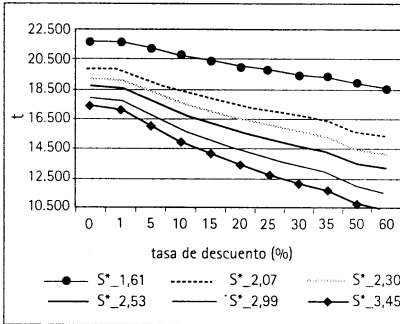
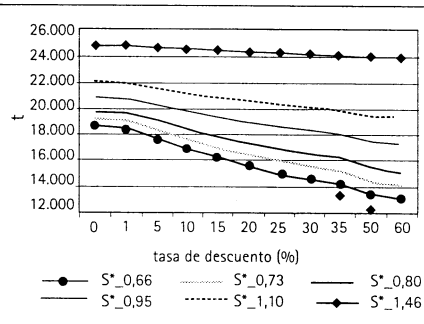


Gráfico 5
Senda óptima del *stock* (S^*) ante variaciones del costo unitario a diferentes tasas de descuento



Fuente: elaboración propia.

Gráfico 6
Senda óptima del esfuerzo pesquero (E^*) ante variaciones del precio a diferentes tasas de descuento

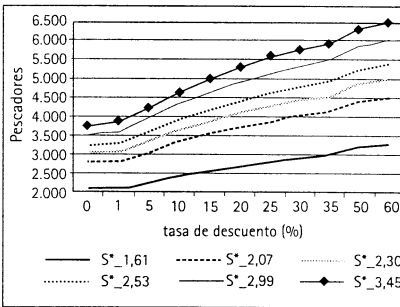
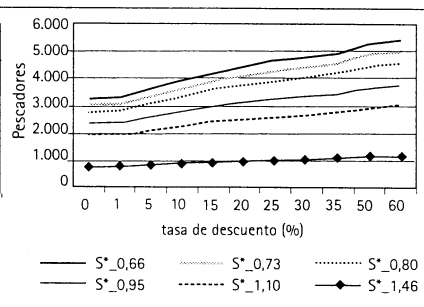


Gráfico 7
Senda óptima del esfuerzo (E^*) ante variaciones del costo unitario a diferentes tasas de descuento



Fuente: elaboración propia.

17. En los gráficos 6 y 7 las leyendas de los niveles de esfuerzo (E^*) van acompañadas de los diferentes escenarios en precios y costos (S_i /kg), respectivamente.

En el gráfico 6 se observa que ante un incremento del precio de $S/. 2,30$ a $S/. 2,99$, el nivel de esfuerzo (numero de pescadores) se incrementa de 3.016 a 3.535 pescadores, respectivamente, a una tasa de descuento de 0%. Ante el mismo incremento del precio y a una tasa de descuento de 15%, el nivel de esfuerzo se incrementa de 3.892 a 4.653 pescadores.

En el gráfico 7 se observa que ante un incremento del costo unitario de extracción de $S/. 0,73$ a $S/. 0,95$, el nivel de esfuerzo disminuye de 3.016 a 2.341 pescadores, respectivamente, a una tasa de descuento de 0%. Ante el mismo incremento del costo unitario de extracción y a una tasa de descuento de 15%, el nivel de esfuerzo disminuye de 3.892 a 2.959 pescadores.

Por lo tanto, se concluye que las variaciones del precio de mercado conllevan diferentes niveles de equilibrio en el esfuerzo pesquero que pone en peligro la biomasa de la especie *Orestias agassii*.

Las sendas de extracción y los niveles de *stock* y esfuerzo son muy sensibles ante variaciones del precio y el costo unitario, dado que el comportamiento del pescador estará basado en cambios que se presenten en el mercado. Ante esta diversidad de escenarios es posible concluir que debe existir un agente regulador para que la pesca sea sostenible y el equilibrio del ecosistema de especies nativas no sea afectado.

5.2.2 Modelo de programación dinámica

Para el desarrollo de este modelo se creó un archivo en MatLab¹⁸ que contiene las funciones de recompensa y transición con sus respectivas primeras y segundas derivadas, y los límites de la variable de estado.

Adicionalmente, se especificó: a) los parámetros α , β , Y , σ , r y k ; b) el empaquetamiento del modelo, como una variable estructural; c) la función base a través de Chebychev; d) las ecuaciones de estado estacionario y la solución del modelo.

El cuadro 5 muestra los resultados obtenidos de la programación para la variable de control (extracción), que indica que el nivel óptimo de extracción se encuentra entre 1.066 y 2.322 t, manteniendo un nivel de *stock* disponible entre 6.000 y 10.324 t de carachi; con este nivel de políticas de extracción en el tiempo, se llega al estado estacionario en promedio en el período 28.

18. El código se basa en el paquete de Compecon relacionado con recursos renovables (Miranda y Fackler 2002).

Cuadro 5

Sendas de los niveles de extracción y stock óptimo del carachi en el lago Titicaca

	$X^* = 2,2$ mil t $S^* = 10,3$ mil t	$X^* = 2.216$ t $S^* = 10.348$ t		
Promedio (1990–2004)				
Estado estacionario	$X^* = 2,3$ mil t de carachi $S^* = 10,3$ mil t de carachi	$X^* = 2.322$ t de carachi $S^* = 10.324$ t de carachi		
Tiempo	sinit=smin		sinit=smin	
	xpath miles de t	spath miles de t	xpath t	spath t
0	1,07	6,00	1.066	6.000
1	1,16	6,37	1.159	6.367
2	1,25	6,72	1.250	6.723
3	1,34	7,06	1.341	7.062
4	1,43	7,38	1.428	7.385
5	1,51	7,69	1.512	7.687
6	1,59	7,97	1.593	7.969
7	1,67	8,23	1.668	8.229
8	1,74	8,47	1.738	8.468
9	1,80	8,69	1.803	8.685
10	1,86	8,88	1.863	8.882
20	2,21	9,97	2.207	9.974
25	2,27	10,17	2.270	10.165
30	2,30	10,26	2.300	10.258
40	2,32	10,32	2.322	10.324

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de la programación en MatLab.

En el gráfico 8 se muestran las políticas de extracción óptima del carachi como un porcentaje del nivel de stock disponible del recurso. Ambos fueron estimados por los métodos de colocación de Chebychev y aproximación lineal cuadrática, cuyos resultados indican que a medida que se incrementa el nivel de stock disponible, la proporción de captura también tiende a aumentar.

El gráfico 9 muestra cómo varía el precio sombra del stock $\lambda(s)$, respecto a variaciones del nivel de stock disponible. Se aprecia una relación inversa, es decir que a medida que el stock disponible se incrementa, su precio sombra disminuye.

Gráfico 8
Política de extracción óptima como porcentaje del nivel de stock disponible

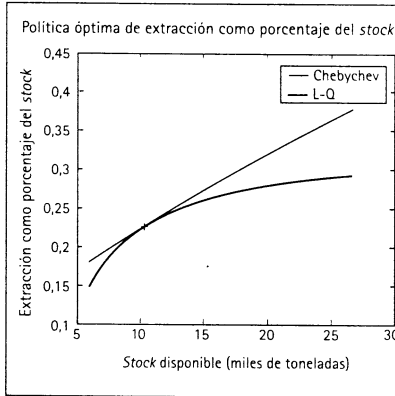
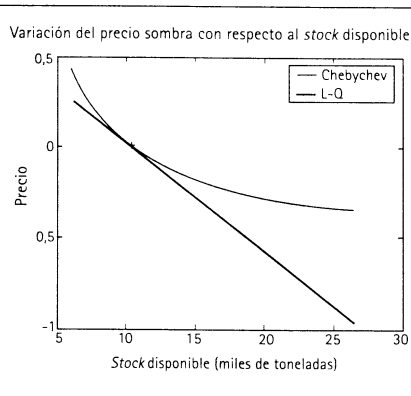


Gráfico 9
Variación del precio sombra del recurso respecto al nivel de stock disponible



Fuente: elaboración propia.

Análisis de post-optimalidad¹⁹. Las estimaciones de post-optimalidad proyectan la senda dinámica del stock del recurso (variable de estado) y políticas óptimas de captura (variable de control). En el primer caso (gráfico 10), la senda óptima de niveles de stock o biomasa del carachi tiene un comportamiento creciente, lo cual indica que el stock llegará a su estado estacionario de 10.322 toneladas en el periodo (año) 28 aproximadamente, el cual se mantendrá estable hasta el horizonte establecido de 40 años. Este comportamiento se analizó con el supuesto de que la biomasa inicial fuese únicamente de 6.000 toneladas de carachi, la cual no abastece los volúmenes permisibles de extracción, así que el pescador podría disminuir sus volúmenes de extracción mientras la biomasa tienda a su estado estacionario (punto óptimo para que la especie sea extraída).

En el gráfico 11 se observan las sendas de extracción óptimas del carachi cuando el nivel de stock es de 6.000 toneladas en un horizonte de 40 años. Si el stock es de 6.000 toneladas, puede notarse que los niveles de extracción son de 1.070 toneladas anualmente; sin embargo, si la extracción es controlada de acuerdo con los volúmenes de stock existentes en el lago, será posible incrementar los niveles de extracción como se observa en el gráfico hasta llegar al estado estacionario de 2.330 toneladas anuales.

19. Véase el anexo 3.

Gráfico 10
Senda óptima del nivel de stock del recurso

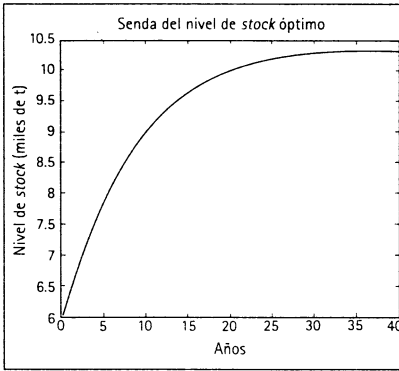
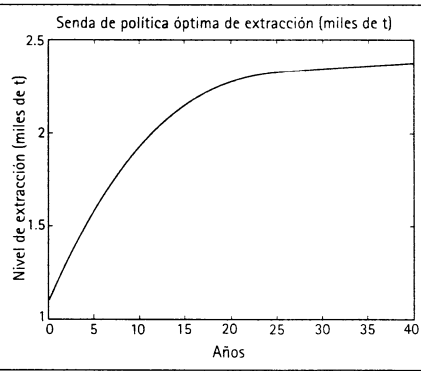


Gráfico 11
Senda de políticas óptimas de extracción del recurso



Fuente: elaboración propia.

Gráfico 12
Senda del nivel de stock si stock inicial es 26.915 toneladas

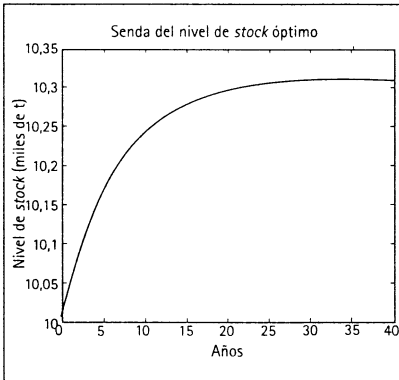
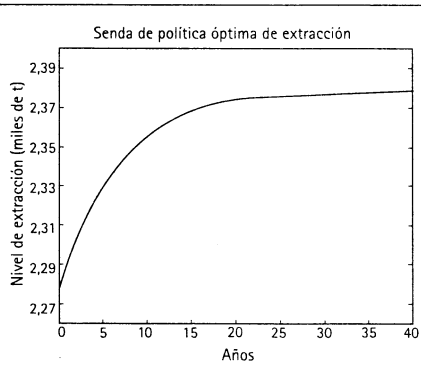


Gráfico 13
Senda de políticas óptimas de extracción para un nivel de stock similar a la capacidad de carga



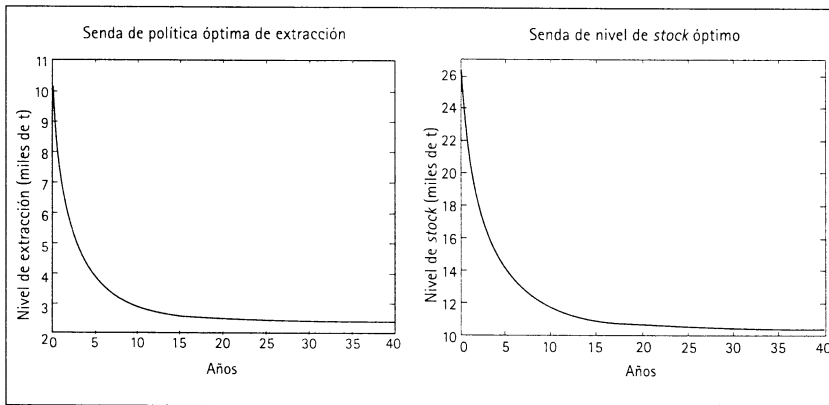
Fuente: elaboración propia.

En los gráficos 12 y 13 se simuló el comportamiento que tendrán los niveles de stock y los niveles de extracción cuando el stock o biomasa de peces en el lago es de 26.915 toneladas ($s_{init} = k \approx \text{stock inicial} = \text{capacidad de carga}$). Por ende, en el gráfico 12 la senda del nivel de stock en el tiempo tiende al estado estacionario, dado que ante grandes proporciones de la especie es lógica la extracción en mayores volúmenes anuales desde el período 0, en que se extrae 2.270 toneladas de carachi, hasta lograr el estado estacionario de 2.330 toneladas anuales, el cual se da aproximadamente en el período 15.

En los gráficos 14 y 15 se observan los niveles óptimos de stock y extracción del recurso para un nivel inicial de 11.000 t de stock. Los niveles de biomasa para un período de 40 años convergen rápidamente al nivel de estado estacionario, lo mismo que el nivel de extracción.

Gráfico 14
Senda del nivel de stock si stock inicial es 11.000 toneladas

Gráfico 15
Senda de políticas de extracción para un stock igual al promedio de stock (1990-2000)



Fuente: elaboración propia.

Las estimaciones de control óptimo, como las de programación dinámica, indican que el recurso carachi en el lago Titicaca está siendo explotado en cantidades superiores a la que permite repoblar el ecosistema. Asimismo, se concluye que los niveles de stock (s^*) y extracción (x^*) óptimos son sensibles a variaciones como la tasa de descuento intertemporal, cambios en los precios, cambios en los costos unitarios de extracción y en los niveles de stock iniciales. Para que el recurso sea sostenible en el largo plazo y se pueda alcanzar los objetivos de conservación de los proyectos del PELT, el ALT y las pesquerías de ambos países, se requiere tomar medidas de regulación antes de que este recurso se extinga.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La especie *Orestias agassii*, conocida comúnmente como «carachi», está siendo sobreexplotada y se recomienda tomar medidas de regulación para que el recurso sea sostenible en el tiempo. Para ello, se requiere la introducción de nuevos procedimientos de manejo que concilien las necesidades de corto plazo de los pescadores de las comunidades altiplánicas con las demandas a largo plazo que exige la sostenibilidad del recurso.

Se requiere un mecanismo que ofrezca un nivel mínimo permisible de capturas (cuotas globales de captura) para mantener el *stock* de poblaciones sostenibles en el futuro. Para lograr este propósito debe asignarse claramente los derechos de propiedad y asimismo considerarse la posibilidad de analizar la pesquería a través de la acción colectiva (participación de grupos de pescadores que respeten y hagan respetar sus medidas correctivas), dado que en la mayoría de las comunidades se rige de alguna manera por reglas internas en el uso del lago Titicaca (utilización de recursos disponibles y extraíbles del lago).

Es importante que los pescadores sientan un interés individual por la tarea de evitar colectivamente la captura excesiva. Una ventaja que existe en la actualidad es que los pescadores artesanales se han agrupado en pequeñas organizaciones generadas para contrarrestar la pesca irresponsable y muestran interés en tomar conciencia sobre el futuro de las especies sobreexplotadas. Asimismo, las autoridades binacionales como el ALT y el PELT promueven proyectos de biodiversidad dirigidos a la recuperación de las especies nativas en peligro de extinción por medio del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Recientes evidencias internacionales demuestran que el mecanismo de las cuotas individuales transferibles (CIT) puede ser adecuado para promover el acceso a las pesquerías, que además podría mejorar si estas funcionaran con esquemas de manejo por comunidades a través de regulaciones más tradicionales (Peña, Torres y Fuentes 1999). Aunque es probable que en la regulación exista incertidumbre sobre los niveles de *stock* de poblaciones en el tiempo, es una medida que aumenta la eficiencia de limitar el acceso de recursos pesqueros bajo propiedad común. En consecuencia, el objetivo claro es la formulación de políticas que permitan mejorar las capacidades de captura que afectan el nivel de biomasa de las especies nativas como el carachi en el lago Titicaca.

Se han realizado actividades de apoyo al sector pesquero por medio de programas de asesoramiento, con la finalidad de repoblar las especies nativas en el lago de tal manera que surja el interés de la actividad acuícola como un soporte compensatorio a la actividad extractiva; por ende, se sugiere seguir con tales programas. Además, la necesidad de iniciar acciones conjuntas se ha propuesto posibles planes de regulación pesquera en las comunidades ribereñas del lago Titicaca, como: definir épocas de veda (identificando las áreas de desove) para determinar la prohibición parcial o total de la pesca de los recursos ícticos; días de pesca (por lo general, se tiene en promedio de 4 a 7 días de pesca), número de redes, número de pescadores y número de embarcaciones. Es poco probable que la pesquería artesanal se rija por medidas globales, aunque las medidas anteriores pueden fortalecer la aplicación de instrumentos económicos para comunidades, junto con actividades de acción colectiva entre los diversos usuarios del recurso.

BIBLIOGRAFÍA

ALIAGA, B.; D. GÓMEZ y S. NEIRA

2001 «Análisis bioeconómico de la pesquería de sardina (*Sardinops sagax*) y anchoveta (*Engraulis ringens*) de la zona norte de Chile». En: *Investigaciones Maritimas Valparaiso* 29(2), pp. 15-23.

AMAYA, P. F.

2003 Desarrollo de un modelo bioeconómico para la pesquería del Atún Aleta Amarilla (*Tunnus albacares*) en el Océano Pacífico oriental. Tesis de Maestría en Economía del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes.

AUTORIDAD BINACIONAL DEL LAGO TITICACA y PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO

2001 *Evaluación del potencial de especies introducidas en el ámbito boliviano del sistema TDPS. Informe final*. Bolivia: Instituto de Desarrollo Rural.

AZURÍN, D. E.

2005 *Recuperación de la ictiofauna nativa del lago Titicaca y su cuenca*. Proyecto de la Dirección Regional de Pesquería – Puno.

BLÁZQUEZ, L. A. y S. J. SÁEZ

2005 *Manual de pesca artesanal para el lago Titicaca*. FAO. Código de conducta para la pesca responsable. La Paz, Bolivia.

BJORNDAL T. y J. M. CONRAD

1987 «The Dynamics of an Open Access Fishery». En: *The Canadian Journal of Economics*, 20(1), pp. 74-85.

BORBÓN G. J.

2003 *Estudio bioeconómico en pesquerías: el caso de la anchoveta norteña*. Mosaicos Matemáticos N° 11. Universidad de Sonora – Departamento de Matemáticas.

CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE y CENTRO DE DESARROLLO AGRARIO Y FORESTAL

2001 *Estudio para establecer nuevos linderos de la reserva nacional del Titicaca y elaboración del plan maestro*. Proyecto PER/G32/98, subcontrato 21.27. Informe final. Puno, Perú.

CLARK, C. y G. MUNRO

1975 «The Economics of Fishing Modern Capital Theory: A Simple Approach». En: *Journal of Environmental Economics and Management* 2, pp. 92-106.

CLARK, C.

1979 «Mathematical Models in the Economics of Renewable Resources». En: *SIAM Review* 21(1), pp. 81-99.

DEJOUX, C. y A. ILLIS

1991 *El lago Titicaca: síntesis del conocimiento limnológico actual*. La Paz, Bolivia: Instituto Francés de Estudios Andinos.

DIRECCIÓN REGIONAL DE PESQUERÍA DE PUNO

2004 *Diagnóstico situacional de la extracción pesquera*. Puno, Perú.

FRÉON, Pierre y R. E. YÁNEZ

1995 «Influencia del medio ambiente en la evaluación de stock: una aproximación con modelos globales de producción». En: *Jornadas en Pesquerías Chilenas*, 10, pp. 25-47.

GAITA, Z. A.

2002 *El lago Titicaca, su régimen legal y el plan director para su conservación y aprovechamiento*. Autoridad Binacional Autónoma del Sistema Hídrico Titicaca, Desaguadero – Poopó – Salar de Coipasa (TDPS) – ALT.

GROENBAEK, L.

2004 «The Dynamics of an Open-Access Fishery». En: *Journal of Political Economics* 62(2), pp. 124-42.

HARDIN, G.

1968 «The Tragedy of the Commons». En: *Science* 162, pp. 1243-8.

HILBORN, R. y C. WALTERS

1992 *Quantitative Fisheries Stock Assessment: Choice, Dynamics and Uncertainty*. Nueva York: Routledge, Chapman y Hall, 570 pp.

JARAMILLO, L.

2005 Análisis bioeconómico de la pesquería de grandes bagres del medio río de Caquetá. Tesis de la Maestría en Economía del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes.

MINISTERIO DE ASUNTOS CAMPESINOS Y AGROPECUARIOS

2005 *Diagnóstico nacional pesquero*. Bolivia: Unidad de Pesca y Acuicultura.

MIRANDA, J. M. y P. L. FACKLER

2002 *Applied Computational Economics and Finance*. North Carolina: The Ohio State University & North Carolina State University Mit Press.

ORLOVE, B. y D. LEVIEIL

1999 «Local Control of Aquatic Resources: Community and Ecology in Lake Titicaca, Perú». En: *American Anthropologist* (New Series) 92(2), pp. 362-82.

OVIEDO, J. M.

2005 *Optimización dinámica en tiempo discreto: ecuación de Bellman*. Argentina: Universidad Nacional de Córdoba – Facultad de Ciencias Económicas.

PEARCE, D. y K. TURNER

1995 *Economía de los recursos naturales y del medio ambiente*. Madrid: Celeste Ediciones.

PEÑA, J.; J. TORRES y R. FUENTES

1999 *Desafíos de política pesquera en Chile: opciones más allá de la coyuntura*. Estudios Públicos 75. Santiago de Chile.

PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE

1996 *Diagnóstico ambiental del sistema Titicaca – Desaguadero – Poopó – Salar de Coipasa (Sistema TDPS) Perú – Bolivia*. Washington, D.C.: Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente.

PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO y AUTORIDAD BINACIONAL DEL LAGO TITICACA

2002 *Conservación de la biodiversidad en la cuenca del Lago Titicaca*. Proyecto PER/G32/98, Subcontrato 21.25. Informe final. Puno, Perú.

QUIROGA, C. V.

2000 Modelo bioeconómico para el manejo sostenible de *Podocnemis expanda* (charapa) en el medio y bajo río Caquetá, departamento del Amazonas – Colombia. Tesis de Maestría en Economía del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes.

SEIJO, J.; O. DEFEO y S. Salas

1997 *Bioeconomía pesquera: teoría, modelación y su manejo*. FAO, Documento Técnico de Pesca 368, pp. 1–176.

SEINFELD, J.; G. CUZQUEN, G. FARJE y S. ZALDÍVAR

1998 *Introducción a la economía de los recursos naturales y del medio ambiente*. Apuntes de Estudio. Universidad del Pacífico, Lima- Perú.

TARQUI, C. F.

2002 *Manejo de pesca sostenible en el Lago Titicaca*. Proyecto BOL/G31/98, subcontrato de desarrollo de la capacidad de programa de pesca artesanal en Bolivia, 21.24. La Paz, Bolivia.

VARELA, M. y D. GARZA

2002 «Avances recientes en la economía de los recursos pesqueros». En: *Economías* 49, I cuatrimestre. Universidad de Vigo.

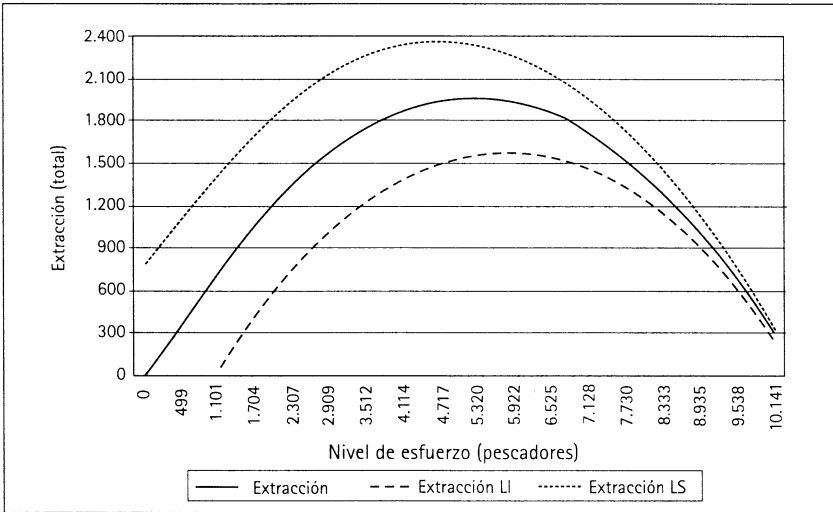
WIFF, R. y R. QUIÑONES

2004 «Environmental Parameterization in Fisheries-Biology Models: A Review». En: *Gayana* (Concepción) 68(1), pp. 76–92. ISSN 0717–6538.

ANEXOS

Anexo 1

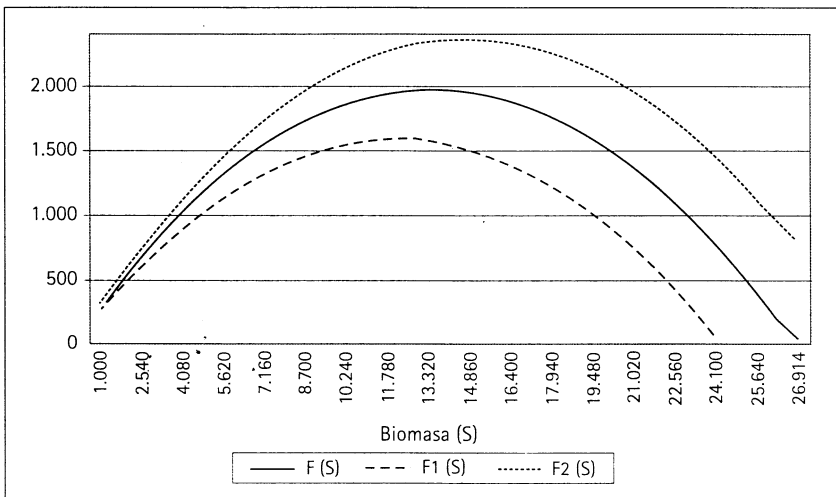
Comportamiento de la curva de función de producción-efuerzo para el recurso carachi en el lago Titicaca



Fuente: elaboración propia sobre la base de la estimación de los parámetros k y r .

Anexo 2

Comportamiento de curva de captura-biomasa del carachi en el lago Titicaca



Fuente: elaboración propia sobre la base de la estimación de los parámetros k y r .

Anexo 3

Políticas óptimas de stock y extracción a diferentes niveles de stock inicial

(nivel de estado estacionario de $X^*=2,3$ mil t y $S^*=10,3$ mil t)

Tiempo	sinit=smin				sinit=k		sinit=11 mil t	
	x path	xpath_min	spath	spath_min	xpath	sptah	xpath	spath
	miles de t	miles de t	miles de t	miles de t	miles de t	miles de t	miles de t	miles de t
0	1,07	0,96	6,00	5,40	10,14	26,90	2,55	11
1	1,16	1,04	6,37	5,73	7,20	21,63	2,52	10,9
2	1,25	1,13	6,72	6,05	5,70	18,62	2,49	10,82
3	1,34	1,21	7,06	6,36	4,80	16,68	2,47	10,75
4	1,43	1,29	7,38	6,65	4,22	15,33	2,45	10,69
5	1,51	1,36	7,69	6,92	3,81	14,35	2,43	10,64
6	1,59	1,43	7,97	7,17	3,51	13,60	2,41	10,6
7	1,67	1,50	8,23	7,41	3,29	13,02	2,40	10,56
8	1,74	1,56	8,47	7,62	3,11	12,56	2,39	10,53
9	1,80	1,62	8,69	7,82	2,98	12,20	2,38	10,51
10	1,86	1,68	8,88	7,99	2,87	11,90	2,38	10,48
11	1,92	1,73	9,06	8,15	2,78	11,65	2,37	10,46
12	1,97	1,77	9,22	8,30	2,71	11,45	2,36	10,45
13	2,01	1,81	9,36	8,42	2,65	11,28	2,36	10,43
14	2,05	1,84	9,48	8,53	2,60	11,14	2,35	10,42
15	2,08	1,88	9,59	8,63	2,56	11,02	2,35	10,41
16	2,12	1,90	9,69	8,72	2,52	10,92	2,35	10,4
17	2,14	1,93	9,78	8,80	2,50	10,84	2,34	10,39
18	2,17	1,95	9,85	8,87	2,47	10,77	2,34	10,39
19	2,19	1,97	9,92	8,92	2,45	10,71	2,34	10,38
20	2,21	1,99	9,97	8,98	2,43	10,65	2,34	10,37
21	2,22	2,00	10,02	9,02	2,42	10,61	2,34	10,37
22	2,24	2,01	10,07	9,06	2,41	10,57	2,34	10,37
23	2,25	2,02	10,10	9,09	2,39	10,54	2,34	10,36
24	2,26	2,03	10,14	9,12	2,38	10,51	2,33	10,36
25	2,27	2,04	10,17	9,15	2,38	10,49	2,33	10,36
26	2,28	2,05	10,19	9,17	2,37	10,47	2,33	10,36
27	2,28	2,06	10,21	9,19	2,36	10,45	2,33	10,35
28	2,29	2,06	10,23	9,21	2,36	10,44	2,33	10,35
29	2,30	2,07	10,24	9,22	2,35	10,42	2,33	10,35
30	2,30	2,07	10,26	9,23	2,35	10,41	2,33	10,35
31	2,30	2,07	10,27	9,24	2,35	10,40	2,33	10,35
32	2,31	2,08	10,28	9,25	2,35	10,39	2,33	10,35
33	2,31	2,08	10,29	9,26	2,34	10,39	2,33	10,35
34	2,31	2,08	10,30	9,27	2,34	10,38	2,33	10,35
35	2,32	2,08	10,30	9,27	2,34	10,38	2,33	10,35
36	2,32	2,09	10,31	9,28	2,34	10,37	2,33	10,35
37	2,32	2,09	10,31	9,28	2,34	10,37	2,33	10,35
38	2,32	2,09	10,32	9,29	2,34	10,36	2,33	10,35
39	2,32	2,09	10,32	9,29	2,33	10,36	2,33	10,35
40	2,32	2,09	10,32	9,29	2,33	10,36	2,33	10,35

Fuente: elaboración propia partir de las simulaciones en el nivel inicial de stock (sinit).