ECONOMÍA

Volumen 7, núm. 3 (septiembre 2011)
11 páginas

http://www.matematicalia.net
ISSN: 1699-7700

Recibido: 27 de agosto de 2011
Publicado: 22 de septiembre de 2011

Gestión de Pesquerías: críticas y alternativas

José María Da Rocha
Departamento de Economía e Historia
Universitat Autònoma de Barcelona y Universidade de Vigo
e-mail: jmrocha @uvigo.es
página web: http://webs.uvigo.es/jmrocha

María José Gutiérrez
Departamento de Fundamentos de Análisis Económico II
Universidad del País Vasco
e-mail: mariajose.gutierrez@ehu.es
página web: http://www.ehu.es/MariaJoseGutierrez

Santiago Cerviño
Instituto Español de Oceanografía
Centro Oceanográfico de Vigo
e-mail: santiago.cervino@vi.ieo.es

Luis T. Antelo
Grupo de Ingeniería de Procesos
Instituto de Investigaciones Marinas (IIM), CSIC
e-mail: ltaboada@iim.csic.es

1. Introducción

Desde Beverton y Holt [3] las pesquerías son gestionadas utilizando puntos de referencia [4]. Los puntos de referencia más extendidos son los asociados con el concepto de *Rendimiento Máximo Sostenible* (MSY, en inglés). Por ejemplo, la Comisión Europea se comprometió en *The World Summit on Sustainable Development* (WSSD) a mantener o restaurar las pesquerías que gestiona en niveles que produzcan el MSY. La principal propiedad que caracteriza los puntos de referencia es su estacionalidad. En el mundo de la gestión de pesquerías, explotación sostenida es sinónimo de poblaciones estables capaces de mantener niveles de capturas y empleo estables en el tiempo. El MSY es fácil de calcular [26] porque la estacionalidad se entiende como atemporalidad, es decir, se considera que la pesquería está en reposo (en equilibrio) y se ignora la dimensión temporal de la gestión del recurso.

¿Qué ocurre cuando se considera la dimensión temporal de un modo explícito? Supongamos que tomamos los parámetros de los modelos utilizados por las agencias internacionales de evaluación y gestión de pesquerías para calcular los puntos de referencia y utilizamos métodos numéricos para buscar el máximo de la suma de los rendimientos a lo largo del tiempo. ¿Encontramos soluciones estacionarias? En general, no. Lo más frecuente es que encontremos estrategias óptimas en forma de pulsos [14]. Estas soluciones no suelen considerarse realistas ya que, salvo que se pueda rotar, implicarían no pescar todos los años.

En este trabajo tratamos de resumir la naturaleza de las soluciones no estacionarias. Para ello, presentaremos en primer lugar condiciones bajo las cuales la gestión óptima es estacionaria. En segundo lugar, introduciremos al lector en los modelos estructurados por edades que constituyen la principal herramienta de las agencias internacionales de evaluación y gestión de pesquerías. En tercer lugar mostraremos que, tal como conjeturó Clark [5], los pulsos son la solución natural de este tipo de modelos. Finalmente, concluiremos discutiendo el interés de basar la gestión de la pesquería en métricas que generan resultados no aceptados como factibles.

2. Gestión óptima de un stock de peces

Supongamos que tenemos X peces y pescamos H. Los que sobreviven, $S = X - H$, se reproducen (y crecen). Por tanto, en el periodo siguiente tendremos $X' = G(S)$ peces, donde $G(S)$ es la función de crecimiento. Supongamos además que queremos obtener el máximo número de peces y maximizar el rendimiento sostenido en el tiempo, pero somos impacientes y ocurre que comer peces mañana es menos valorado que comerlos hoy. ¿Cuántos peces debemos pescar si queremos mantener una explotación sostenida?

Este es un problema sencillo (al menos aparentemente). La variable de estado que describe la dinámica del sistema (la pesquería) es el número de peces, X. La variable de decisión, la cantidad que debemos pescar en cada periodo, H, debe maximizar la suma descontada de todos los peces que es posible pescar de un modo sostenido (durante infinitos años), $\sum_{t=0}^{\infty} \beta^t H$, teniendo en cuenta que los peces que nos comemos hoy no crecen ni se reproducen, y que por tanto si hoy comemos mucho habrá menos peces mañana, $X' = G(X - H)$. La suma descuenta el futuro a una tasa $\beta = 1/(1+r) < 1$, donde $r > 0$ es el tipo de interés (el rendimiento de activos alternativos).

La solución de este problema es una regla de decisión que nos indica cuantos peces debemos tener mañana como una función de los que hay hoy. Para encontrar la regla, podemos reescribir el problema de un modo más simple, en función de los peces que dejamos escapar, S. Por tanto, nuestro problema es determinar cuánto recurso dejamos escapar hoy, como una función de lo que dejamos escapar ayer. De esta forma, se define $S' = f(S)$ como la función de política que nos permite calcular la gestión óptima de la pesquería. Conocido lo que dejamos escapar ayer, sabemos cuántos tenemos hoy, $X = G(S)$, y utilizando la regla $H = G(S) - f(S)$, sabemos cuánto pescar hoy. Pero, ¿cómo encontramos la regla $f(S)$?

Richard E. Bellman [2] se dio cuenta de que es posible descomponer los problemas de optimización dinámica en subproblemas más sencillos que relacionan la decisión que debemos tomar hoy con la función del valor (continuador) del problema mañana. Esta relación se basa en el principio de optimalidad de Bellman: una regla óptima debe satisfacer que con independencia del estado inicial y de la decisión tomada hoy, el resto de las decisiones han de ser óptimas. En teoría de juegos diríamos que la solución debe ser "perfecta en subjuegos".

Por tanto, el principio de optimalidad nos indica que la regla $S' = f(S)$, que maximiza el valor descontado de pescar de un modo sostenido desde hoy, $V(S) = \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t H\big|_{S'=f(S)}$ debe maximizar la suma del valor obtenido por la regla hoy, $G(S) - S'$, más el valor de seguir pescando con la misma regla desde mañana, $\beta\ V(S')$. Por tanto, la función de valor que resuelve el problema debe satisfacer la ecuación de Bellman:

$$\underbrace{V(S)}_{\text{Valor hoy de haber dejado escapar ayer } S \text{ peces}} = \max_{S'=f(S)} \left\{ \underbrace{G(S) - S'}_{\text{Pesca de hoy si dejamos escapar } S'} + \underbrace{\beta\ V(S')}_{\text{Valor mañana de dejar escapar hoy } S'} \right\}.$$

Esta ecuación, cuya incógnita es la función $V(S)$, caracteriza la regla. Usando las condiciones de primer orden del problema (derivando respecto a la regla):

$$-1 + \beta dV(S') = 0,$$

y aplicando el teorema de la envolvente:

$$dV(S) = dG(S),$$

obtenemos la condición que debe satisfacer la regla:

$$dG(f(S^*)) = \beta^{-1} = 1 + r\ .$$

Nótese que $dG(f(S^*))$ no es una ecuación en diferencias. Ello nos indica que la regla óptima es aquélla que deja escapar siempre el número de peces que mantiene la población reproductora (el escape S^*) constante. Esta población reproductora iguala el crecimiento del recurso al coste de la espera $1+r$. Es decir, los peces son un activo real (crecen) y pescamos hasta que su rendimiento iguala el rendimiento promedio de los mercados (el tipo de interés). Por tanto, ¿cuánto debemos pescar? Si tenemos muchos peces, debemos pescar la diferencia entre los que hay, $X = G(S)$, y los que queremos tener mañana, S^*. Si hay pocos, y $G(S) - S^*$ es negativo, no debemos pescar nada. Esta regla de escape constante racionaliza las políticas pesqueras que observamos: existe una población de peces $G(S)$ y autorizamos capturas para alcanzar un objetivo de biomasa, S^*, que mantenga a la población del periodo siguiente en niveles similares:

$$\underbrace{G(S^*)}_{\text{población } X^* \text{ generada por } S^*} \quad - \quad H \quad = \quad \underbrace{S^*}_{\text{población reproductora para generar } X^*}$$

¿Cómo de robusta es esta regla de pesca? La ausencia de dinámica transicional depende de la linealidad de la función objetivo. Sin embargo, ésta no es una condición necesaria. Supongamos que la función objetivo no es lineal, y queremos maximizar una función $\Pi(G(S) - S')$. Reed [24] mostró que si es posible reescribir el problema de un modo lineal en valores (en vez de capturas), la regla óptima sigue verificando la propiedad de escape constante. Obviamente, el nivel de escape dependerá de $\Pi(\cdot)$. Si por ejemplo introducimos costes por pescar, dejaremos escapar más peces.

¿Es siempre óptimo usar una regla de escape constante? No. Es más, en ocasiones la regla de pesca óptima ni siquiera es continua. Supongamos que existiesen costes elevados asociados a la actividad de pescar pero independientes del número de peces que pescamos. Este es el caso cuando son costes asociados a la localización del banco de peces; y luego pescar más o menos peces cuesta lo mismo. En este caso, la función objetivo no es convexa y la solución del problema no es continua [11, 23]. Este tipo de problemas fueron estudiados por Scarf [25]: cómo gestionar de un modo óptimo un almacén que incurre en costes fijos cada vez que repone mercancía. La función de política que resuelve el problema es conocida como "S grande, s pequeña", (S, s).

En la gestión de pesquerías, en vez de reponer, retiramos: permitimos que la población de peces crezca hasta el nivel $X = G(S)$, pescamos H y dejamos $s = G(S) - H$, y luego permitimos que pasen varios períodos sin pescar hasta que volvamos a alcanzar la población "S grande". En la literatura, estas estrategias discontinuas se llaman *pulsos* y son el tipo de estrategias que seguimos la mayoría de nosotros desde que tenemos neveras en casa. En vez de seguir políticas continuas e ir todos los días al mercado a comprar, para mantener el número de alimentos de la nevera constante, dejamos que se vacíe, llegamos a "s pequeña", y luego vamos al mercado y compramos, para alcanzar la "S grande". Este tipo de políticas discontinuas, que no obligan a destinar todos los días tiempo a comprar, favoreció el acceso de la mujer al mercado de trabajo y constituye, junto a la luz eléctrica (la otra forma de extender la cantidad de horas que se puede trabajar), uno de los hechos con mayor impacto sobre el crecimiento económico.

3. Pero, ¿cuántos peces hay en el mar?

Las reglas que hemos obtenido son simples y se pueden aplicar a cualquier recurso: vacas, bosques... Basta con contar cuántos peces hay para saber cuántos podemos extraer. Sólo hay un pero: a diferencia de los árboles o las vacas, los peces están bajo el mar y, además, ¡se mueven!

La biología pesquera ha desarrollado una forma indirecta de contar los peces que hay en el mar que consiste en inferirlos a partir de los que fueron pescados en el pasado. El método se conoce como *Virtual Population Analysis* y utiliza modelos estructurados por edades para estimar pirámides (virtuales) de poblaciones de peces que son capaces de reproducir las capturas observadas en el pasado [20]. Los modelos estructurados por edades descomponen la población de peces en cohortes, es decir, en grupos de peces que tienen la misma edad y, probablemente, el mismo tamaño, peso y maduran al mismo tiempo.

Supongamos que la población se descompone en A cohortes. En este caso, en cada periodo de tiempo sobreviven $A-1$ del periodo anterior, y nace una cohorte nueva, los reclutas. Sea z_t^a la tasa de mortalidad de la cohorte a en el periodo t, que puede descomponerse en mortalidad por pesca, F_t^a, y mortalidad "natural" (por otros depredadores, enfermedades, vejez, etc…), m^a:

$$z_t^a = F_t^a + m^a.$$

Consideraremos que la mortalidad por pesca varía a lo largo de los años, pero que la mortalidad natural es constante en el tiempo.

La mortalidad por pesca depende de la selectividad de la tecnología (del arte de pesca) utilizada, que determina la mezcla de peces de distintas edades que se capturan. Estos patrones de selectividad introducen diferencias entre las mortalidades de pesca de las cohortes. Es decir, la mortalidad por pesca de la cohorte a puede escribirse como el producto de la selectividad de la tecnología, p^a, por un indicador del "esfuerzo de pesca" (número de días) realizado en el periodo, F_t :

$$F_t^a = p^a F_t.$$

Supongamos que se pesca de un modo continuo a lo largo del periodo de pesca. En este caso, el tamaño de las cohortes varía entre dos periodos de tiempo consecutivos de acuerdo a

$$N_{t+1}^{a+1} = \phi^a(F_t) N_t^a,$$

donde $\phi^a(F_t) = \exp(-p^a F_t - m^a)$ es la tasa de supervivencia de la cohorte y N_t^a el tamaño de la cohorte al inicio del periodo t. Por último, los reclutas dependen del número de reproductores. Si denotamos por μ^a la fracción de peces sexualmente maduros de cada cohorte, el número total de reproductores (SSB en inglés) es igual a $SSB_t = \sum_{a=1}^{A} \mu^a N_t^a$, y los reclutas son iguales a $N_t^1 = G(SSB_t)$.

Para calcular las capturas asociadas a un nivel de esfuerzo, solo tenemos que realizar un simple balance. Sea D_t^a y C_t^a el número de muertos de la cohorte por motivos naturales y por pesca, respectivamente. Entonces, dado que $N_{t+1}^{a+1} = N_t^a - D_t^a - C_t^a$, podemos escribir las capturas como

$$C_t^a = \frac{F_t^a}{z_t^a}[1 - \varphi^a(F_t)] N_t^a.$$

Esta ecuación se conoce como la *ecuación de capturas de Baranov* [1], y constituye la base de los modelos de evaluación y gestión utilizados por las agencias internacionales de pesca.

Este modelo estructurado por edades permite estimar poblaciones virtuales que son capaces de reproducir las sendas de capturas por edades observadas a lo largo del tiempo. Para ello, se realizan campañas biológicas que muestrean las capturas, contando, pesando, sexando y tallando los ejemplares capturados. Posteriormente, en el laboratorio, se determina la edad de los peces capturados contando los anillos anuales de los otolitos (unas estructuras calcáreas que se encuentran en el oído interno de los peces). Supongamos que en el periodo t se dispone de una muestra de capturas pesadas por edades. Para estimar la evolución de la pirámide de la población, basta con suponer que conocemos la pirámide en el periodo t, y la última cohorte a lo largo de toda la muestra. Luego, usando las ecuaciones de Baranov y supervivencia es posible estimar una matriz de mortalidades por pesca resolviendo recursivamente un sistema de ecuaciones

$$C_{t-1}^{a} = \frac{F_{t-1}^{a-1}}{z_{t-1}^{a-1}} \frac{[1-\varphi^{a-1}(F_{t-1})]}{\varphi^{a-1}(F_{t-1})} N_t^a .$$

La pirámide de población en el periodo t, que queríamos estimar, será igual a la que maximiza la verosimilitud del ajuste del modelo $\left\{C_\tau^a\right\}_{\tau=t-T-1}^{t-1}$ a los datos $\left\{\hat{C}_\tau^a\right\}_{\tau=t-T-1}^{t-1}$. La solución además nos proporciona los patrones de selectividad y los esfuerzos de pesca.

4. Gestión óptima en modelos estructurados por edades

Si las artes de pesca fueran perfectamente selectivas podríamos decidir la edad óptima a la que los peces deberían ser capturados. La teoría es simple. Sea w^a el valor, en euros, de un pez de edad a. La edad óptima es aquélla en la que la tasa de crecimiento del valor del pez (el beneficio marginal de dejarlo crecer) es igual al tipo de interés r (el coste marginal de dejarlo crecer). Es decir:

$$\frac{w^a - w^{a-1}}{w^{a-1}} = r .$$

Esta regla es la misma que derivamos en los modelos no estructurados. Dado que $\beta = 1/(1+r)$ y en este contexto $G' = w^a / w^{a-1}$, podemos volver a escribir la regla de escape constante. Por tanto, con selectividad perfecta la política óptima es estacionaria y consiste en dejar crecer los peces hasta que no sea económicamente rentable seguir engordándolos.

Sin embargo, las artes de pesca no son perfectamente selectivas, por lo que la regla de explotación dependerá de la selectividad de la tecnología pesquera. Para ilustrarlo, supongamos que los peces viven dos años. Son juveniles el año uno y adultos el año dos. Denotemos como $N_t^{juveniles}$ y $N_t^{adultos}$ al número de juveniles y adultos que hay en el periodo t. Supongamos que los juveniles no tienen valor comercial, $w^{juveniles} = 0$, y que no es posible pescar adultos sin matar algunos juveniles, $p^{adultos} > p^{juveniles} > 0$. Para simplificar todavía más el análisis, supongamos que el número de juveniles es constante e igual a 1 en cualquier periodo, $N_t^{juveniles} = 1,$ y que $w^{adultos} = 1$. Bajo estos supuestos, el número de adultos es igual a la tasa de supervivencia de los juveniles, $N_t^{adultos} = \varphi^{juveniles}(F_{t-1})$ y la ecuación de Baranov (las capturas de cada periodo), se escribe como

$$H(F_t \mid F_{t-1}) = \underbrace{h^{adultos}(F_t)}_{\text{fracción de adultos capturada}} \quad \underbrace{\varphi^{juveniles}(F_{t-1})}_{\text{número de adultos}},$$

donde $h^{adultos}(F_t) = \frac{p^{adultos} F_t}{p^{adultos} F_t + m}[1-\varphi^{adultos}(F_t)]$ es la fracción de adultos capturados.

¿Cuál es la regla óptima cuando consideramos la edad? Una forma sencilla de caracterizar la regla es describir sus condiciones necesarias. Una senda de esfuerzo pesquero que maximiza el rendimiento sostenible debe resolver, para todo t,

$$\max_{F_t \geq 0} \quad h^{adultos}(F_t) \quad \varphi^{juveniles}(F_{t-1}) + \beta h^{adultos}(F_{t+1}) \quad \varphi^{juveniles}(F_t) .$$

Nótese que sin selectividad perfecta, no podemos elegir la población de juveniles y adultos que capturamos. Sólo podemos elegir la cantidad de esfuerzo pesquero que autorizamos, $F_t \geq 0$. La regla óptima satisface una ecuación en diferencias de orden dos:

$$\lambda_t \quad \left[\frac{dh^{adultos}(F_t)}{dF_t} \;\; \phi^{juveniles}(F_{t-1}) + \beta h^{adultos}(F_{t+1}) \;\; \frac{d\phi^{juveniles}(F_t)}{dF_t} \right] = 0,$$

donde λ_t es el multiplicador asociado a la restricción $F_t \geq 0$.

Tahvonen [27] mostró que tenemos dos posibles soluciones. Una es estacionaria con esfuerzo constante, $F_t = F_{t-1} = F$. Otra solución es un ciclo de orden dos, en el que se cumple que $F_t = F_{t+2} = F_1$ y $F_{t+1} = F_{t+3} = F_2$. Da Rocha, Gutiérrez y Antelo [9] muestran que un pulso del tipo $F_1 = 0$ y $F_2 = \infty$ siempre verifica las condiciones de primer orden del problema de maximización. ¿Cuál de los dos posibles candidatos será el óptimo? Para determinarlo, debemos calcular el valor asociado a la explotación sostenida de la pesquería bajo cada una de las dos estrategias. Si la explotación se realiza con la estrategia 1 (estacionaria), el rendimiento de la pesquería será igual a

$$V_{estacionaria} = \frac{h^{adultos}(F) \quad \varphi^{juveniles}(F)}{1-\beta}.$$

Si la explotación se realiza con la estrategia 2 (pulsos),

$$V_{pulsos} = \frac{\exp(-m)}{1-\beta^2}.$$

¿Cuál de las dos estrategias es mejor? Con baja selectividad, la estrategia 2 es mejor. La intuición nos dice que con baja selectividad la estrategia 1 permite pescar pocos adultos, ya que cada vez que vamos a pescar matamos muchos juveniles. Por tanto, compensa dejar de pescar un periodo, para aumentar lo máximo posible la tasa de supervivencia de los juveniles, de tal modo que cuando pesquemos haya muchos adultos.

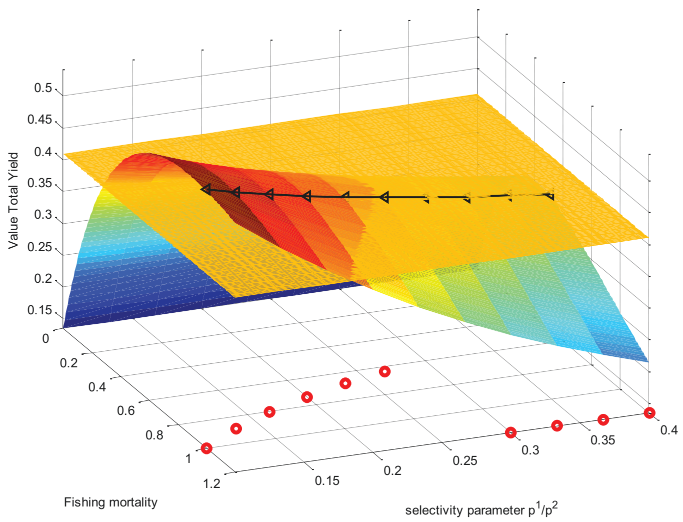


Figura 1. Valor presente descontado promedio por año con estrategias estacionarias y periódicas.

Una explicación más formal es que la ecuación de Baranov genera una función objetivo que no es globalmente cóncava. La Figura 1 muestra, para distintos niveles de selectividad, el rendimiento sostenido (la campana), y lo compara con el rendimiento anual promedio de la estrategia no estacionaria (el plano). Mientras, la Figura 2 muestra la función objetivo, cuando ésta se representa en el plano $F_t = F_{t+2} = F_1$ y $F_{t+1} = F_{t+3} = F_2$.

Aunque las estrategias estacionarias generan, en el eje $F_t = F_{t-1} = F$, curvas de rendimiento cóncavas, la función objetivo no es globalmente cóncava, y cuando la selectividad es baja (panel derecho) la estrategia de pulsos es mejor.

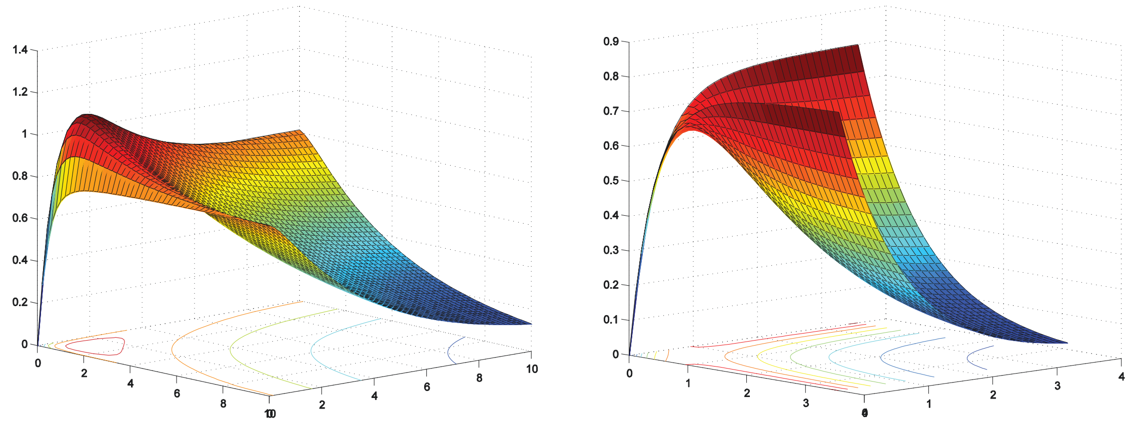


Figura 2. Función objetivo en el plano F_t, F_{t+1}. Alta selectividad panel izquierdo y baja selectividad panel derecho.

Con dos edades sólo son posibles dos soluciones. ¿Qué ocurre para un número de edades mayor que 2? Da Rocha, Gutiérrez y Antelo [9] muestran que la regla de explotación óptima de la pesquería es equivalente a elegir, una vez más, la edad promedio a la que se pescan los peces. Aunque no es posible elegirla de un modo directo, podemos elegirla de un modo indirecto: si queremos tener muchos peces de edad T, podemos pescar cada T años! El valor de maximizar el número de individuos de edad T es igual a $V(T) = \left(1-\beta^T\right)^{-1} \sum_{a=1}^{T} w^a \exp\left(-\left(a-1\right)m\right)$. Por tanto, la regla óptima puede entenderse como una forma de elegir la edad óptima de los peces (el T que maximiza el valor descontado de la pesquería).

¿Qué implicaciones tienen estos resultados? Aunque MSY exista, en ocasiones es un punto de silla (y, por tanto, no es óptimo). En nuestro ejemplo, MSY es la solución de un problema atemporal, que se escribe como

$$\max_{F \geq 0} \quad h^{adultos}(F) \quad \varphi^{juveniles}(F),$$

y cuya solución verifica $D_1 h^{adultos}(F) - \ k\ h^{adultos}(F) = 0$ y $D_2 h^{adultos}(F) - \ k^2\ h^{adultos}(F) < 0$, donde D_1 y D_2 representan la primera y segunda derivada, respectivamente y $k = d\varphi^{juveniles} / dF = p^{juveniles} > 0$. Sin embargo, el hessiano del problema dinámico evaluado en $\beta = 1$, para que la solución estacionaria coincida con MSY, es igual a

$$\phi^{juveniles}(F)\ k^2 \begin{vmatrix} \dfrac{D_2 h^{adultos}(F)}{k^2} - \ h^{adultos}(F) & h^{adultos}(F) \\ h^{adultos}(F) & \dfrac{D_2 h^{adultos}(F)}{k^2} - \ h^{adultos}(F) \end{vmatrix}.$$

Por tanto, aunque $D_2 h^{adultos}(F) - k^2\ h^{adultos}(F) < 0$, MSY será óptimo si, y sólo si, el hessiano es semidefinido negativo y

$$\left(\frac{D_2 h^{adultos}(F)}{k^2} - \ h^{adultos}(F)\right)^2 - h^{adultos}(F)^2 > 0.$$

Pero ello no se verifica siempre, ya que cuando la tecnología pesquera es poco selectiva y k es grande, el primer término se hace muy pequeño.

4. Discusión y conclusiones

La biología pesquera ha desarrollado potentes métodos para estimar las poblaciones virtuales de peces y las selectividades de la tecnología pesquera, que reproducen la estructura de edades de las capturas en el pasado. Estimados los patrones de selectividad y el tamaño de las cohortes, las agencias internacionales de evaluación y gestión de pesquerías determinan objetivos que las pesquerías debe alcanzar (o mantener) y evalúan distintas estrategias temporales que permitan mantener o alcanzar los objetivos propuestos.

A pesar de que los modelos estructurados por edades se vienen usando desde hace años, ha sido sólo recientemente cuando se han caracterizado sendas óptimas [27, 9]. Dados los objetivos fijados por las propias agencias, las soluciones discontinuas no son artificiosas: surgen de la propia naturaleza del problema. Si queremos maximizar el rendimiento, dejar de pescar algunos periodos es óptimo.

Las estrategias discontinuas han sido aplicadas a lo largo de la historia, cuando es posible rotar espacialmente entre distintas zonas de pesca [15]. Sin embargo, en general, las soluciones no estacionarias son consideradas de difícil aplicación. Por tanto, las agencias internacionales de evaluación y gestión de pesquerías se restringen a recomendar soluciones estacionarias [13, 19, 12, 6, 7, 8, 10]. Por tanto, la gestión actual de la pesquería está basada en métricas que generan soluciones que no son aceptadas como factibles.

En este contexto, lo más razonable sería cambiar la métrica utilizada para evaluar las estrategias temporales que permitan mantener o alcanzar los objetivos. Una primera forma de hacerlo es definir índices que, de un modo explícito, incorporen nuestras reticencias a aceptar soluciones periódicas. Ello es muy simple. Como nos gustan las soluciones estacionarias, bastaría con que las agencias internacionales adoptasen índices basados en nuestras “preferencias” en vez de en el rendimiento del recurso. Maximizando el logaritmo de las capturas, el “$\log MSY$”, se eliminarían los pulsos.

Sin embargo, eliminar la contradicción entre métrica y resultados propuestos no evitará que en el futuro surjan nuevas paradojas. Por ejemplo, Liz y Pilarczyk [21] muestran que, con funciones de reclutamiento denso-dependientes, las estrategias estacionarias (pesca constante) pueden generar todo tipo de dinámicas en la población de peces: bifurcaciones, oscilaciones, burbujas, etc.

Por tanto, otra posibilidad es no evaluar la optimalidad de los objetivos y restringirnos a evaluar la optimalidad de mantenernos próximos a ellos. Este es el enfoque utilizado por los bancos centrales para simular el impacto de las medidas de política monetaria, y tiene muchas ventajas. Estudiar la naturaleza de las sendas óptimas en el entorno de un punto es fácil de implementar utilizando métodos lineal-cuadráticos [16]. Esto permite definir funciones multi-objetivo e incorporar de manera sencilla la naturaleza estocástica del reclutamiento, tal como en ocasiones sugieren los datos [22]. Además, es posible introducir consideraciones de incertidumbre de modelado (control robusto) que son utilizados en la actualidad en la gestión de las pesquerías [17].

Referencias

[1] ^ F.I. Baranov: On the question of the biological basis of fisheries. *Institute for Scientific Ichthyological Investigations, Proceedings* 1(1) (1918), 81-128.

[2] ^ R.E. Bellman: *Dynamic Programming*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 1957. [Reedición: Dover, 2003].

[3] ^ R.J.H. Beverton, S.J. Holt: *On the dynamics of exploited fish population.* Fish. Invest. II, 19, 1957. [Reedición: Chapman and Hall, London, 1993].

[4] ^ J.F. Caddy, R. Mahon: *Reference points for fisheries management*. FAO Fish. Tech. Pap. 347, 1995.

[5] ^ C.W. Clark: *Mathematical bioeconomics*. John Wiley, New York, 1976.

[6] ^ J.M. Da Rocha, S. Cerviño, E. Jardim: *What have been lost by not accomplishing the Southern hake recovery plan?* Working document for STECF-SGMOS 10-06b, Vigo, October 2010.

[7] ^ J.M. Da Rocha, S. Cerviño, M.J. Gutiérrez: An endogenous bioeconomic optimization algorihm to evaluate recovery plans: an application to southern hake. *ICES J. Mar. Sci*. 67 (2010), 1957-1962.

[8] ^ J.M. Da Rocha, M.J. Gutiérrez: Lessons from the long-term management plan for northern hake stock: Could the economic assessment have accepted it? *ICES J. Mar. Sci.* [en prensa], 2011.

[9] a b c J.M. Da Rocha, M.J. Gutiérrez, L.T. Antelo: *Selectivity, pulse fishing and endogenous lifespan in Beverton Holt models*. Documento de trabajo, 2011. [Disponible en http://www.ehu.es/MariaJoseGutierrez].

[10] ^ J.M. Da Rocha, M.J. Gutiérrez, L.T. Antelo: *Pulse vs. optimal stationary fishing: The Northern stock of hake*. Documento de trabajo, 2011. [Disponible en http://www.ehu.es/MariaJoseGutierrez].

[11] ^ H. Dawid, M. Kopel: On the economically optimal exploitation of a renewable resource: The case of a convex environment and a convex return function. *J. Econ. Theory* 76 (1997), 272-297.

[12] ^ C.M. Dichmont, S. Pascoe, T. Kompas, A.E. Punt, R. Deng: On implementing maximum economic yield in commercial fisheries. *PNAS* 107 (2010), 16-21.

[13] ^ R.Q. Grafton, T. Kompas, R.W. Hilborn: Economics of overexploitation revisited. *Science* 318 (2007), 1601.

[14] ^ R. Hannesson: Fishery dynamics: a North Atlantic cod fishery. *Canad. J. Econ*. 8 (1975), 151-173.

[15] ^ D.R. Hart: Yield-and biomass-per-recruit analysis for rotational fisheries, with an application to the Atlantic sea scallop (Placopecten magellanicus). *Fish. B.-NOAA* 101 (2003), 44-57.

[16] ^ J.W. Horwood, P. Whittle: The optimal harvest from a multicohort stock. *IMA J. Math. Appl. Med. Biol.* 3 (1986), 143-155.

[17] ^ L.T. Kell, I. Mosqueira, P. Grosjean, J.M. Fromentin, D. Garcia, R. Hillary, E. Jardim, S. Mardle, M. Pastoors, J.J. Poos, F. Scott, R.D. Scott: FLR: an open-source framework for the evaluation and development of management strategies. *ICES J. Mar. Sci.* 64 (2007), 640-646.

[18] T. Kompas, C.M. Dichmont, A.E. Punt, A. Dent, T.N. Che, J. Bishop, P. Gooday, Y. Ye, S. Zhou: Maximizing profits and conserving stocks in the Australian Northern Prawn Fishery. *Aust. J. Agric. Resour. Econ*. 54 (2010), 281-299.

[19] ^ S. Kulmala, M. Laukkanen, C. Michielsens: Reconciling economic and biological modeling of migratory fish stocks: optimal management of the atlantic salmon fishery in the Baltic Sea. *Ecol. Econ.* 64 (2008), 716-728.

[20] ^ H. Lassen, P. Medley: *Virtual Population Analysis: A practical manual for stock assessment.* FAO Fish. Tech. Pap. 400, 2000.

[21] ^ E. Liz, P. Pilarczyk: *Global dynamics in a stage-structured discrete population model with harvesting*, 2011. [Disponible en http://www.pawelpilarczyk.com/papers.php].

[22] ^ J. Lobón-Cerviá: Why, when and how do fish populations decline, collapse and recover? The example of brown trout (*Salmo trutta*) in Rio Chaballos (northwestern Spain). *Fresh. Biol.* 54(6) (2009), 1149-1162.

[23] ^ J.M. Maroto, J. Moran: Increasing marginal returns and the danger of collapse of commercially valuable fish stocks. *Ecol. Econ.* 68 (2008), 422-428.

[24] ^ W.J. Reed: Optimal escapement levels in stochastic and deterministic harvesting models. *J. Environ. Econ. Manage.* 6 (1979), 350-363.

[25] ^ H. Scarf: *The optimality of (S,s) policies in the Dynamic Inventory Problem*. In K.J. Arrow, S. Karlin, P. Suppes (eds.): *Mathematical Methods in the Social Sciences. Proceedings of the First Stanford Symposium*. Stanford University Press, Stanford, 1960 (1959), 196-202.

[26] ^ J.G. Shepherd: A versatile new stock-recruitment relationship for fisheries, and the construction of sustainable yield curves. *ICES J. Mar. Sci.* 40(1) (1982), 67-75.

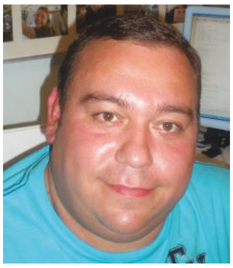
[27] a b O. Tahvonen: Economics of harvesting age-structured fish populations. *J. Environ. Econ. Manage.* 58 (2009), 281-299.

Sobre los autores

Jose María Da Rocha es actualmente profesor titular de Análisis Económico en la Universitat Autonòma de Barcelona. Obtuvo su doctorado en la Universidad de Vigo en 1993, donde fue profesor, vicedecano y vicerrector. Ha sido profesor en la Universidad Carlos III de Madrid y profesor visitante en la Universidad de Minnesota, en el Instituto Tecnológico de México (ITAM) y en el Institut d'Anàlisi Econòmica del CSIC. Sus trabajos han sido publicados en revistas internacionales como *Journal of Economic Theory*, *International Economic Review*, *Review of Economic Dynamics*, *Journal of Regulatory Economics*, *Environmental Resource Economics*, *ICES Journal of Marine Science* and *Fisheries Research,* entre otras. Su investigación actual se sitúa en la resolución de problemas de optimización con modelos estructurados por edades y/o ecuaciones diferenciales parciales (PDE) y sus aplicaciones en la Gestión de Pesquerías, los Recursos Naturales y la Macroeconomía.

María José Gutiérrez es catedrática de Análisis Económico en la Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU), donde ha permanecido desde 1992. Es actualmente Directora de Planificación de Plantilla Docente e Investigadora en el Vicerrectorado de Profesorado de la UPV/EHU. Obtuvo su máster y doctorado en la State University of New York at Stony Brook en 1989 y 1992, respectivamente. Ha sido profesora visitante en University of California, San Diego en 1999 y en Kansas State University en 2009 y 2011. Sus trabajos han sido publicados en revistas internacionales como *Journal of Environmental Economics and Management*, *Environmental Resource Economics*, *Journal of Economic Dynamics and Control*, *ICES Journal of Marine Science*, *International Tax and Public Finance*, *Journal of Public Economic Theory* y *Journal of Institutional and Theoretical Economics*, entre otras. Su investigación principal se sitúa en los campos de la Economía de los Recursos Naturales y Ambientales y de la Macroeconomía.

Santiago Cerviño es doctor en Biología por la Universidad de Vigo en 2004. Investigador titular del Instituto Español de Oceanografía (IEO) desde 2004, orienta su labor investigadora a la evaluación de recursos pesqueros y sus implicaciones en la gestión, con especial atención a métodos de evaluación, integración de procesos biológicos (relación stock-recluta, relaciones tróficas, etc.), modelado dinámico y métodos de simulación (*bootstrap*, monte carlo, bayesianos), así como evaluación de estrategias de gestión. Ha participado en proyectos de investigación europeos y nacionales orientados a la mejora del conocimiento para la gestión pesquera. Ha publicado en revistas especializadas tales como *ICES Journal of Marine Science, Fisheries Research, Continental Shelf Research, Ecography*, etc. Es miembro de diversos grupos de expertos de organismos internacionales (NAFO, ICES o STECF) como asesor científico en gestión de recursos pesqueros.



Luis Taboada Antelo cursó los estudios de Ingeniería Química en la Universidad de Santiago de Compostela para, posteriormente, incorporarse al grupo de Ingeniería de Procesos del Instituto de Investigaciones Marinas - CSIC como becario FPI del Ministerio de Ciencia e Innovación. Obtuvo el título de doctor en Ingeniería Química por la Universidad de Vigo en 2008, siendo Premio Extraordinario de Doctorado. En la actualidad sigue desarrollando su actividad científica como investigador postdoctoral financiado por el programa "Ánxeles Alvariño" de la Xunta de Galicia en el mismo grupo. Sus principales líneas de trabajo son el modelado, control y optimización de bioprocesos, aplicando estas herramientas también a otros campos como la gestión sostenible de los recursos marinos, así como al modelado socioeconómico de los stocks pesqueros. Como resultado, ha publicado numerosas contribuciones en revistas científicas internacionales de alto índice de impacto, así como presentado comunicaciones en prestigiosos congresos internacionales. Asimismo, en la actualidad es coordinador técnico de un proyecto del programa LIFE+ de la UE denominado FAROS, que pretende la creación de una red de gestión óptima, integral y eficiente de los descartes generados por el sector pesquero.