

ANÁLISIS DEL ERROR DE PROCESO Y DE OBSERVACIÓN EN LA ESTIMACIÓN DEL RECLUTAMIENTO DE LA SARDINA DEL PACÍFICO, *Sardinops sagax caeruleus* (GIRARD), EN LA COSTA SUROESTE DE LA PENÍNSULA DE BAJA CALIFORNIA, MÉXICO

ANALYSIS OF THE PROCESS AND OBSERVATION ERROR IN RECRUITMENT ESTIMATES FOR THE PACIFIC SARDINE, *Sardinops sagax caeruleus* (GIRARD), OFF THE SOUTHWEST COAST OF THE BAJA CALIFORNIA PENINSULA, MEXICO

Enrique Morales-Bojórquez

Instituto Nacional de la Pesca
Centro Regional de Investigación Pesquera, La Paz
Carretera a Pichilingue km 1
La Paz, CP 23020, Baja California Sur, México
E-mail: criplp1@prodigy.net.mx

Recibido en enero de 1999; aceptado en junio de 1999

RESUMEN

En este trabajo se analizó la dinámica de la relación *stock*/reclutamiento para la sardina del Pacífico *Sardinops sagax caeruleus* (Girard) en la costa suroeste de la península de Baja California, México, de 1981 a 1993. Se utilizó un estimador de máxima verosimilitud para calcular los parámetros del modelo suponiendo dos hipótesis: (a) error de proceso en el modelo y (b) error de observación en los datos. Los resultados mostraron que la hipótesis del error de proceso fue aceptada. Los valores de los parámetros y sus intervalos de confianza (IC) fueron los siguientes: $\alpha = 2.7$ (IC = 2.0–3.6, $P < 0.05$) y $\beta = 0.04$ (IC = 0.03–0.05, $P < 0.05$), con $\sigma = 0.58$; el valor máximo de la función objetivo $L(R_{Est}|\alpha, \beta) = 1.16 \times 10^{-5}$. En este trabajo la variabilidad ambiental no es interpretada como variabilidad aleatoria (ruido); en este caso, el modelo fue usado para demostrar y evaluar los efectos de una hipótesis estadística acerca de la posible relación *stock*/reclutamiento considerando la estructura del error en el modelo y el efecto estocástico en los parámetros.

Palabras clave: hipótesis, máxima verosimilitud, reclutamiento, error, parámetros.

ABSTRACT

This paper analyzed the dynamics of the stock-recruitment relationship for the Pacific sardine *Sardinops sagax caeruleus* (Girard) off the southwest coast of the Baja California peninsula, Mexico, from 1981 to 1993. A maximum likelihood estimator was used to estimate the parameters of the model assuming two hypotheses: (a) process error in the model and (b) observation error in the data. The results showed that the hypothesis of the process error was accepted. The parameter values and confidence intervals (CI) were as follows: $\alpha = 2.7$ (CI = 2.0–3.6, $P < 0.05$) and $\beta = 0.04$ (CI = 0.03–0.05, $P < 0.05$), with $\sigma = 0.58$; the maximum value of the objective function $L(R_{Est}|\alpha, \beta) = 1.16 \times 10^{-5}$. In this paper,

environmental variability is not interpreted as random variability (noise); the model was used to demonstrate and quantify effects of a statistical hypothesis on the possible stock-recruitment relationship, based on the error structure of the model and the stochastic effect on the parameters.

Key words: hypothesis, maximum likelihood, recruitment, error, parameters.

INTRODUCCIÓN

Una forma de explicar la relación que existe entre la parentela (denominado en lo sucesivo *stock*) y el reclutamiento es la demostración de hipótesis estadísticas relacionadas con la estructura del error en los modelos de *stock* y reclutamiento (Ludwig y Walters, 1981; Walters y Ludwig, 1981; Schnute, 1991; Hilborn y Walters, 1992), del cual se definen dos tipos: el error de proceso y el error de observación. El primero corresponde a las variaciones en el reclutamiento por factores no incluidos en el modelo, es decir, otras fuentes ajenas al tamaño del *stock* (Ludwig y Walters, 1981), y el segundo, a variaciones debidas a la incertidumbre en el verdadero valor del *stock* (Walters y Ludwig, 1981). En la medición del error en la relación *stock*/reclutamiento se identifican dos tipos de efectos: (1) los parámetros estimados pueden ser inconsistentes como un resultado de autocorrelación en la ecuación de regresión y (2) la cantidad de información disponible puede ser sobrestimada. En ambos casos los parámetros estimados presentan un importante sesgo (Walters y Ludwig, 1981).

Una forma de sesgo puede resultar cuando la influencia del ambiente sobre el reclutamiento tiene un componente no aleatorio en la forma de variaciones periódicas (Armstrong y Shelton, 1988); de esta manera, aunque la variabilidad aleatoria sea frecuentemente introducida dentro de los modelos poblacionales para incrementar su capacidad de ajuste, hay evidencias que muestran que la variabilidad interanual no es un efecto aleatorio (Huato-Soberanis y Lluch-Belda, 1987; Lluch-Belda *et al.*, 1989, 1991, 1992a, b). Algunos mecanismos de forzamiento ambiental de baja frecuencia han sido sugeridos para explicar tendencias en poblaciones marinas (Armstrong y Shelton, 1988; Cisneros-Mata *et al.*, 1996); no

INTRODUCTION

One way to describe the relationship between stock and recruitment is to use statistical hypotheses related to the error structure in stock-recruitment models (Ludwig and Walters, 1981; Walters and Ludwig, 1981; Schnute, 1991; Hilborn and Walters, 1992), of which there are two types: the process error and the observation error. The first corresponds to variations in recruitment due to factors not included in the model, that is, sources not related to stock size (Ludwig and Walters, 1981), and the second to variations due to the uncertainty in the true stock value (Walters and Ludwig, 1981). Measurement errors in the stock-recruitment relationship identifies two types of effects: (1) the parameter estimates may be inconsistent, as a result of autocorrelation in the regression equation and (2) the amount of information available may be overestimated. In both cases, the parameter estimates present an important bias (Walters and Ludwig, 1981).

One type of bias may occur when the influence of the environment on recruitment has a nonrandom component in the form of periodic variations (Armstrong and Shelton, 1988); thus, although random variability is frequently introduced into population models to increase their fitting capability, there is evidence that interannual variability is not a random effect (Huato-Soberanis and Lluch-Belda, 1987; Lluch-Belda *et al.*, 1989, 1991, 1992a, b). Some low-frequency environmental forcing mechanisms have been suggested to explain trends in marine populations (Armstrong and Shelton, 1988; Cisneros-Mata *et al.*, 1996); however, a common procedure in the study of the stock-recruitment relationship is to

obstante, un procedimiento común para el estudio de la relación *stock*/reclutamiento es el análisis de la estructura del error dentro del mismo modelo (Schnute, 1991). La evaluación final del error de proceso y del error de observación puede mostrar, bajo dos diferentes tipos de análisis, la precisión de los parámetros estimados (Freeman y Kirkwood, 1995), especialmente cuando la relación *stock*/reclutamiento es la base sobre la cual se proponen estrategias de manejo en una determinada pesquería. Con base en lo anterior, el objetivo de este trabajo es analizar la dinámica de generaciones de *Sardinops sagax caeruleus* comparando el efecto del error de proceso y observación en un modelo de *stock* y reclutamiento.

MATERIAL Y MÉTODOS

Los estimados del *stock* y reclutamiento de *S. sagax caeruleus* se obtuvieron de un análisis de población virtual realizado en el programa ELEFAN III versión 1.1 (Gayanilo *et al.*, 1989), utilizando el número de individuos estimados de forma anual de 1981 a 1993 (para detalles, ver Félix-Uraga *et al.*, 1996), que correspondieron a las capturas realizadas en Bahía Magdalena, Baja California Sur, e Isla Cedros, Baja California (fig. 1). Durante este periodo, la estructura de la población fue determinada a través de la lectura de los otolitos *sagittae*. La mortalidad natural (M) fue estimada usando el método de Silliman (Ricker, 1975), con valor de $M = 0.6$. La fracción del reclutamiento fue constituida por la edad de un año, ya que durante la edad cero, los organismos se consideran únicamente reclutados al área, razón por la cual su presencia en las capturas comerciales es baja (Félix-Uraga, 1986), mientras que el *stock* fue conformado con las edades de dos a cuatro años, que constituyen las edades completamente reclutadas a la pesquería.

Para el análisis de los dos distintos tipos de error, se ajustó la relación *stock*/reclutamiento de Ricker (1975):

analyze the error structure of the model (Schnute, 1991). The final evaluation of the process error and the observation error can show, under two different types of analysis, the precision of the parameter estimates (Freeman and Kirkwood, 1995), especially when the stock-recruitment relationship is the foundation of management strategies proposed for a given fishery. Based on the above, the objective of this study is to analyze the generation dynamics of *Sardinops sagax caeruleus* by comparing the effect of both the process and observation error in a stock-recruitment model.

MATERIAL AND METHODS

The stock and recruitment estimates of *S. sagax caeruleus* were obtained through a virtual population analysis with ELEFAN III software version 1.1 (Gayanilo *et al.*, 1989), using the number of individuals estimated annually from 1981 to 1993 (see Félix-Uraga *et al.*, 1996 for details), which corresponded to landings from Magdalena Bay, Baja California Sur, and Cedros Island, Baja California (fig. 1). The population structure during this period was determined from observations of the sagitta otoliths. Natural mortality (M) was estimated with Silliman's method (Ricker, 1975), with $M = 0.6$. The recruit fraction was made up of organisms of one year of age, since the age zero organisms only recruit to the area and their occurrence in the commercial catches is low (Félix-Uraga, 1986); the stock consisted of organisms of two to four years of age, at which time they are completely recruited to the fishery.

In order to analyze the two different types of error, Ricker's (1975) stock-recruitment relationship was fit to:

$$R_{Obs} = \alpha S_{Obs} \exp^{-\beta S_{Obs}} \quad (1)$$

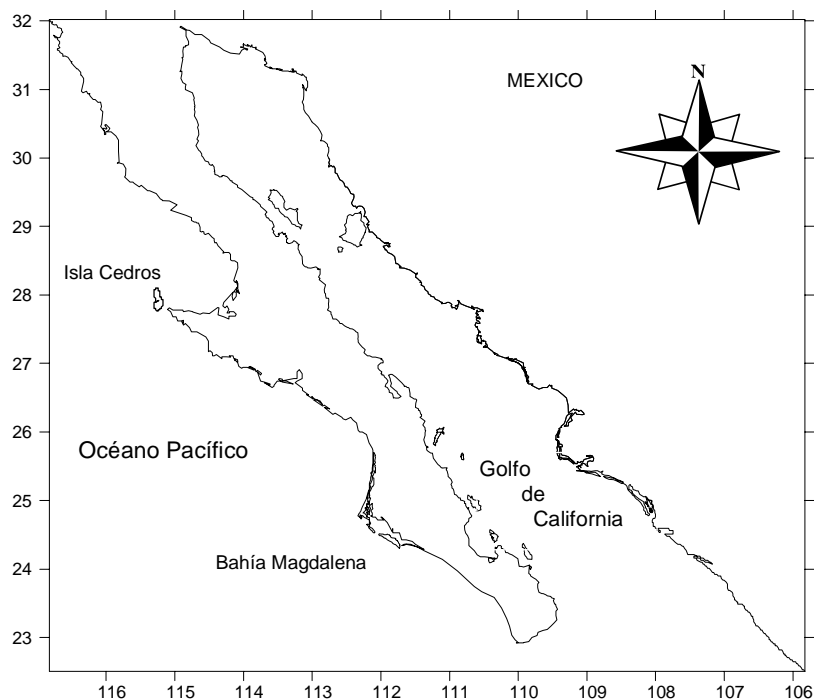


Figura 1. Zona de estudio en la costa oeste de la península de Baja California, México.
Figure 1. Study area on the west coast of the peninsula of Baja California, Mexico.

En este caso se utilizó un ajuste no lineal (Cisneros-Mata *et al.*, 1995) para tener un estimado inicial de los parámetros, donde α es el coeficiente asociado con la mortalidad denso-independiente; β , el coeficiente asociado con la mortalidad densodependiente; R_{Obs} , el reclutamiento observado con el análisis de población virtual; y S_{Obs} , el *stock* observado con el análisis de población virtual.

El error de proceso (w_t) para cada unidad de tiempo t (años) fue incluido de la siguiente forma y bajo la siguiente hipótesis: H_1 = las variaciones en el reclutamiento se deben a factores no incluidos en el modelo (Hilborn y Walters, 1992):

A nonlinear fit was used (Cisneros-Mata *et al.*, 1995) to have an initial estimate of the parameters, where α is the coefficient associated with density independent mortality; β , the coefficient associated with density dependent mortality; R_{Obs} , the recruitment observed with the virtual population analysis; and S_{Obs} , the stock observed with the virtual population analysis.

The process error (w_t) for each unit of time t (years) was included in the following manner and under the following hypothesis: H_1 = the variations in recruitment are due to factors not included in the model (Hilborn and Walters, 1992):

$$R_{Obs} = \alpha S_{Obs} \exp^{-\beta S_{Obs}} \exp^{(w_t)} \quad (2)$$

La estimación de w_t se obtuvo a partir de la siguiente relación (Hilborn y Walters, 1992):

$$w_t = \ln\left(\frac{R_{Obs}}{\alpha S_{Obs}}\right) + (\beta S_{Obs}) \quad (3)$$

Posteriormente se estimó la verosimilitud (L) del error de proceso (w_t); suponiendo una distribución log normal de w_t , la función de verosimilitud para cada año analizado presenta la siguiente forma:

$$L(w_t) = \left[-\frac{1}{2} * \ln(2 * \pi) \right] - \left[\frac{1}{2} * \ln(\sigma^2) - \frac{w_t^2}{2 * \sigma^2} \right] \quad (4)$$

El producto final de la estimación de la verosimilitud para cada año t se utilizó para estimar los parámetros de la relación *stock*/reclutamiento de Ricker (1975), encontrando una solución que hiciera máxima la siguiente función de verosimilitud de acuerdo con el siguiente modelo:

$$L(R_{Est} | \alpha, \beta) = \prod_t \left[-\frac{1}{2} * \ln(2 * \pi) \right] - \left[\frac{1}{2} * \ln(\sigma^2) - \frac{w_t^2}{2 * \sigma^2} \right] \quad (5)$$

En este caso se encontró la máxima verosimilitud del R_{Est} (reclutamiento estimado) dados los parámetros α y β . Para el caso de σ (desviación estándar) de w_t , se planteó la siguiente solución analítica:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (\ln(R_{Obs}) - \ln(R_{Est}))^2} \quad (6)$$

En este caso t es el tiempo en años, n es el número de años y R_{Est} es el reclutamiento estimado a través del modelo de Ricker (1975).

La estimación del error de observación (v_t) en la relación *stock*/reclutamiento supone la siguiente hipótesis: H_2 = la fracción poblacional del *stock* está medida con error; por tanto, el error de observación para el caso de este trabajo se supone de la siguiente manera: $v_t = N(0, \sigma_v)$. De

The estimate of w_t was obtained with the following relation (Hilborn and Walters, 1992):

Likelihood (L) of the process error (w_t) was then estimated; assuming a log-normal distribution of w_t , the likelihood function for each year analyzed presents the following form:

The final product of the likelihood estimate for each year t was used to estimate the parameters of Ricker's (1975) stock-recruitment relationship, with one solution that would maximize the following likelihood function according to the model:

In this case, the maximum likelihood of R_{Est} (estimated recruitment) was found given the α and β parameters. For σ (standard deviation) of w_t , the following analytical solution was proposed:

In this case, t is the time in years, n is the number of years and R_{Est} is the recruitment estimated with Ricker's (1975) model.

The estimate of the observation error (v_t) in the stock-recruitment relationship assumes the following hypothesis: H_2 = the population fraction of the stock is measured with errors; therefore, the observation error for this study is assumed to be $v_t = N(0, \sigma_v)$. Thus, according to

esta manera, el *stock* de acuerdo con Walters y Ludwig (1981) se expresa de la siguiente forma: $(S_{Obs} \exp^{(v_t)})$.

En este tipo de análisis, aceptar alguna de las hipótesis anteriores implica reconocer que una forma de error permitirá explicar de mejor manera la tendencia del reclutamiento. Con los resultados de la hipótesis aceptada y que a la vez mostró una mejor reconstrucción del reclutamiento, se construyó un perfil de verosimilitud de α y β (Hilborn y Walters, 1992). Los intervalos de confianza (IC) de los parámetros α y β en el perfil de verosimilitud fueron estimados suponiendo una distribución χ^2 , con m grados de libertad (Polacheck *et al.*, 1993; Punt y Hilborn, 1996). En este caso la estimación de los IC no se realizó de manera conjunta, sino independiente para α y β , por lo que el IC para cada parámetro fue definido como todos los valores que satisfacen la siguiente condición (Polacheck *et al.*, 1993):

$$IC = 2[L(Y \setminus p) - L(Y \setminus p_{est})] \leq \chi_{m, 1-\alpha}^2 \quad (7)$$

donde $L(Y \setminus p_{est})$ es la máxima verosimilitud del parámetro ($p_{est} = \alpha$ o β , según el caso) y $L(Y \setminus p)$ es la verosimilitud del parámetro dentro del perfil de verosimilitud; $\chi_{m, 1-\alpha}^2$ es el valor de la distribución χ^2 a un nivel de confianza $1 - \alpha$ y $m = 1$. De esta forma, el IC para el estimador (ecuación 7) aceptará a todos los valores menores o iguales a 3.84 (Polacheck *et al.*, 1993). Una nueva estimación de los intervalos de confianza de los parámetros α , β y σ , y de la función de verosimilitud $L(R_{Est} \setminus \alpha, \beta)$, se realizó utilizando la técnica del “*bootstrap* parametrizado”, en el cual Freeman y Kirkwood (1995) y Punt y Hilborn (1996) recomiendan una simulación mínima de una serie de 500 números aleatorios con media 0 y desviación estándar σ (ecuación 6).

RESULTADOS

El análisis de la estructura del error en el modelo de *stock* y reclutamiento de Ricker (1975)

Walters and Ludwig (1981), stock is expressed as $(S_{Obs} \exp^{(v_t)})$.

In this type of analysis, the acceptance of either of the above hypotheses implies that one form of error will best explain the recruitment trend. A likelihood profile of α and β was constructed with the results of the accepted hypothesis that, at the same time, showed a better reconstruction of the recruitment (Hilborn and Walters, 1992). The confidence intervals (CI) of the α and β parameters in the likelihood profile were estimated assuming a χ^2 distribution, with m degrees of freedom (Polacheck *et al.*, 1993; Punt and Hilborn, 1996). Independent CI estimates were made for α and β , and therefore, the CI for each parameter was defined as all the values that satisfy the following condition (Polacheck *et al.*, 1993):

where $L(Y \setminus p_{est})$ is the maximum likelihood of the parameter ($p_{est} = \alpha$ or β , depending on the case) and $L(Y \setminus p)$ is the likelihood of the parameter within the likelihood profile; $\chi_{m, 1-\alpha}^2$ is the value of the χ^2 distribution at a confidence level of $1 - \alpha$ and $m = 1$. Thus, the CI of the estimator (equation 7) will accept all the values lower or equal to 3.84 (Polacheck *et al.*, 1993). New CI estimates of the α , β and σ parameters and of the likelihood function $L(R_{Est} \setminus \alpha, \beta)$ were made using the parametric bootstrap technique, in which Freeman and Kirkwood (1995) and Punt and Hilborn (1996) recommend a minimum simulation of one series of 500 random numbers with 0 mean and σ standard deviation (equation 6).

RESULTS

The analysis of the error structure in Ricker's (1975) stock-recruitment model indicated that the

mostró que el error de proceso tiene un mejor ajuste que el reclutamiento estimado con el análisis de error de observación (fig. 2); en este caso, con el estimador del error de proceso fue posible describir la tendencia del reclutamiento observado. Con respecto al análisis del error de observación, se mostraron claras desviaciones entre los reclutamientos observados y estimados; con este estimador los parámetros del modelo de *stock* y reclutamiento fueron los siguientes: $\alpha = 2.88$ y $\beta = 0.03$.

En este trabajo, la hipótesis H_1 sobre la estructura del error en el modelo de Ricker (1975) fue aceptada. De esta forma, los perfiles de verosimilitud de los parámetros α y β fueron estimados (fig. 3), y los IC de χ^2 correspondieron a los siguientes valores: $\alpha = 2.7$ (IC = 2.0–3.6, $P < 0.05$) y $\beta = 0.04$ (IC = 0.03–0.05, $P < 0.05$), con $\sigma = 0.58$, mientras que el valor máximo de la función objetivo $L(R_{Est}|\alpha, \beta) = 1.16 \times 10^{-5}$. En el análisis del *bootstrap* parametrizado (fig. 4) se muestran IC más amplios que con la estimación del perfil de verosimilitud, en este caso los IC de $\alpha = 0.7$ –20.6, $\beta = 0.003$ –0.12, $\sigma = 0.22$ –1.04 y, finalmente, $L(R_{Est}|\alpha, \beta) = 5.77 \times 10^{-9}$ – 0.12.

DISCUSIÓN

El modelo que mostró la mejor reconstrucción del reclutamiento observado fue el estimador del error de proceso; por tanto, se aceptó la hipótesis H_1 que se refiere a las variaciones en el reclutamiento por factores no incluidos en el modelo. Algunos aspectos que explican las variaciones en el reclutamiento, según Punt y Hilborn (1996), son: cambios en la mortalidad natural, cambios en la estructura por edades o tallas de la población, cambios en la distribución espacial por migración y variabilidad en el ambiente, entre otros. Ludwig y Walters (1981) mencionan que en el manejo a largo plazo es irrelevante comentar que el reclutamiento puede ser predicho a través de la variabilidad ambiental, ya que asignan un mayor peso al tamaño del *stock* por ser éste el único que puede ser controlado a través del manejo. Bajo este

process error has a better fit than the recruitment estimated with the analysis of the observation error (fig. 2); in this case, it was possible to describe the recruitment trend observed with the process error estimator. With respect to the analysis of the observation error, clear deviations were noted between the observed and estimated recruitments; the parameters of the stock-recruitment model with this estimator were: $\alpha = 2.88$ and $\beta = 0.03$.

In this study, the H_1 hypothesis for the error structure of Ricker's (1975) model was accepted. The likelihood profiles of the α and β parameters were estimated (fig. 3), and the CI of χ^2 corresponded to: $\alpha = 2.7$ (CI = 2.0–3.6, $P < 0.05$) and $\beta = 0.04$ (CI = 0.03–0.05, $P < 0.05$), with $\sigma = 0.58$, and the maximum value of the objective function $L(R_{Est}|\alpha, \beta) = 1.16 \times 10^{-5}$. In the parametric bootstrap analysis (fig. 4), the CI observed were wider than in the likelihood profile estimates, in this case, the CI of $\alpha = 0.7$ –20.6, $\beta = 0.003$ –0.12, $\sigma = 0.22$ –1.04 and $L(R_{Est}|\alpha, \beta) = 5.77 \times 10^{-9}$ – 0.12.

DISCUSSION

The process error estimator was the model that best reconstructed the observed recruitment. The H_1 hypothesis was therefore accepted, which relates the variations in recruitment to factors not included in the model. According to Punt and Hilborn (1996), some aspects that explain variations in recruitment are: changes in natural mortality, changes in the age or size structure of the population, changes in the spatial distribution due to migration and environmental variability, among others. Ludwig and Walters (1981) report that it is irrelevant to comment that recruitment can be predicted from environmental variability in long-term management, since they assign a greater weight to stock size because this can be controlled through management. With this in mind, a correct stock size estimate has an important effect on the type of hypothesis that can be accepted; some methods of greater precision are

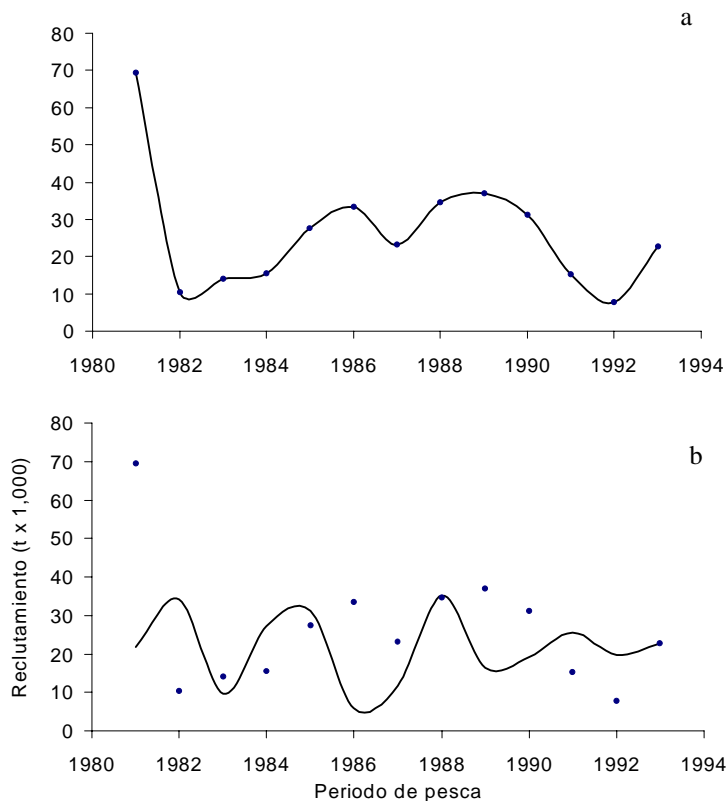


Figura 2. Estimación del reclutamiento de *Sardinops sagax caeruleus*: (a) error de proceso y (b) error de observación. Los puntos representan las observaciones y la línea el modelo estimado.

Figure 2. Recruitment estimates of *Sardinops sagax caeruleus*: (a) process error and (b) observation error. The dots represent the observations and the line, the estimated model.

concepto, la correcta estimación del tamaño del stock tiene una influencia importante sobre el tipo de hipótesis que se podría aceptar; algunos métodos de mayor precisión son el modelo estructurado por edades de Fournier y Archibald (1982), el modelo de síntesis de stock (Methot, 1989) y el modelo de CAGEAN (Catch-Age Analysis) desarrollado por Deriso *et al.* (1985). La ventaja de estos modelos es la incorporación de información independiente de la pesquería, es decir, índices de abundancia como captura por unidad de esfuerzo (CPUE), huevos, larvas, estimaciones

the age-structured model of Fournier and Archibald (1982), the stock synthesis model (Methot, 1989) and the CAGEAN (catch-age analysis) model developed by Deriso *et al.* (1985). These models have the advantage of incorporating information independent of the fishery, for example, abundance indices such as catch per unit effort (CPUE), eggs, larvae, echo-sound estimates and aerial censuses. This information is used through objective functions (difference of the sum of squares or maximum likelihood fitting), which allow us to assign a

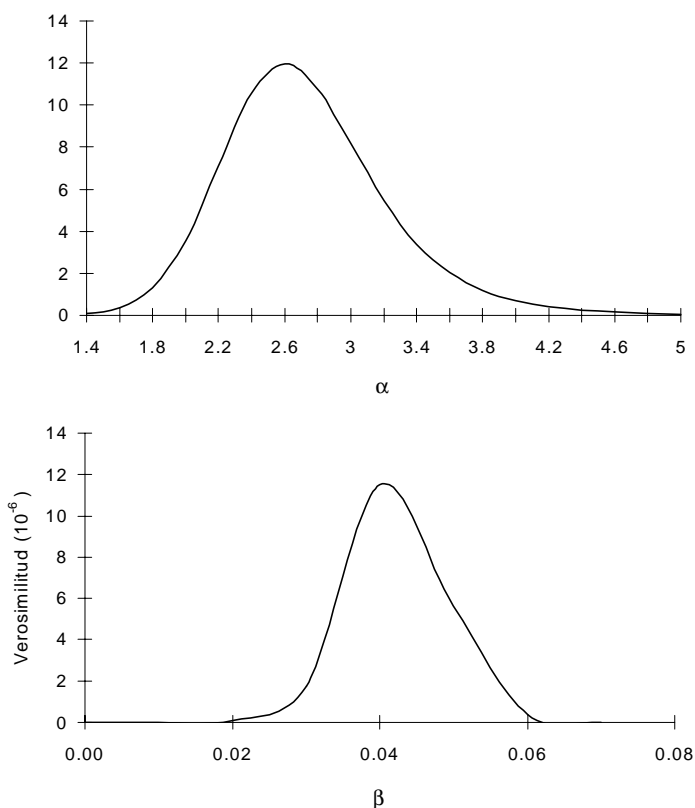


Figura 3. Perfil de verosimilitud de los parámetros α y β estimados con el error de proceso.
Figure 3. Likelihood profile of the α and β parameters estimated with the process error.

por ecosonda y censos aéreos, entre algunos otros. El uso de esta información es a través de las funciones objetivo (diferencia de suma de cuadrados o ajustes de máxima verosimilitud), permitiendo asignar un determinado peso a cada índice independiente de la pesquería; de esta forma se estiman escenarios y variaciones posibles en el *stock*, de acuerdo con el índice o índices utilizados para la calibración (para detalles ver Megrey, 1989). Sin embargo, construir y validar un modelo de *stock* y reclutamiento que explique la evidencia estocástica de w_t también puede dar información sobre la influencia de varios factores ambientales que pueden aumentar la incertidumbre en la estimación de los parámetros. Walters y

determined weight to each index independent of the fishery; thus, scenarios and possible variations in the stock are estimated according to the index or indices used in the tuning (see Megrey, 1989 for details). However, if a stock-recruitment model is constructed and validated that accounts for the stochastic evidence of w_t , it can also provide information on the effect of different environmental factors that may contribute to the uncertainty in the parameter estimates. Walters and Ludwig (1981) describe the effect of the observation error on the uncertainty of the parameters using Monte Carlo simulations in the stock-recruitment relationship. In this study, the parametric bootstrap analysis indicated wide

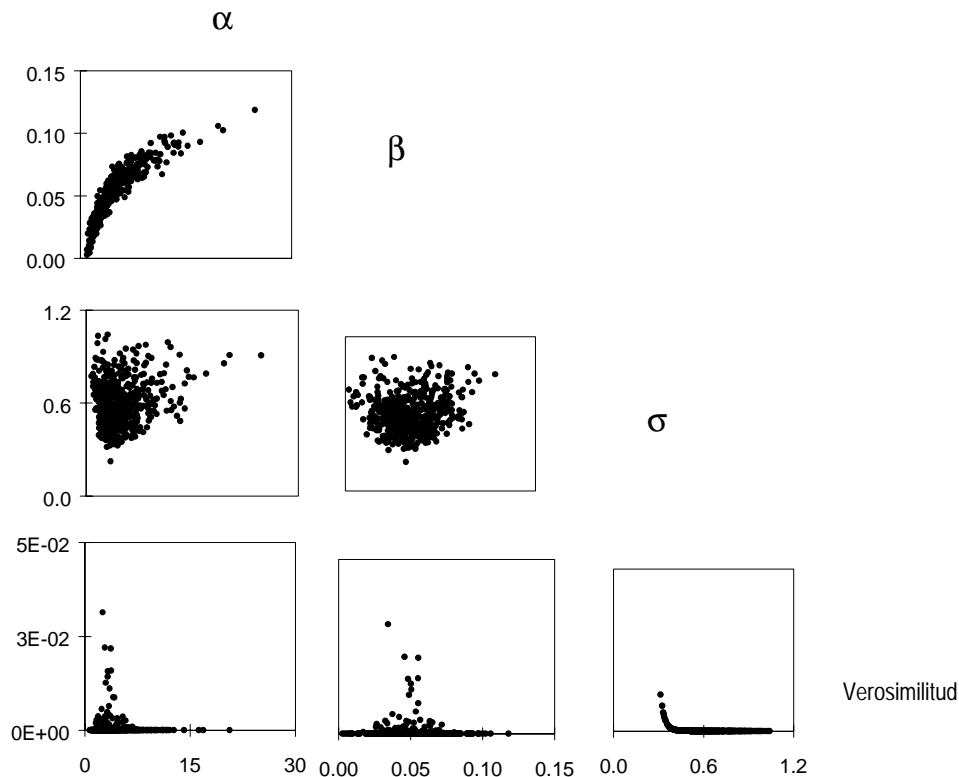


Figura 4. Intervalos de confianza de los parámetros α , β y σ y de la función de verosimilitud $L(R_{Est}|\alpha, \beta)$, usando el *bootstrap* parametrizado.

Figure 4. Confidence intervals of the α , β and σ parameters and of the likelihood function $L(R_{Est}|\alpha, \beta)$, using the parametric bootstrap.

Ludwig (1981) describen el efecto del error de observación sobre la incertidumbre de los parámetros usando simulaciones Monte Carlo en la relación *stock/reclutamiento*. En este trabajo, el análisis de *bootstrap* parametrizado permitió observar amplias variaciones en los parámetros por efecto de la estocasticidad (ruido) en el modelo y la incertidumbre en los parámetros a través del efecto del error de proceso.

En el caso de la pesquería de la sardina del Pacífico, se ha sugerido que los cambios en los patrones de la temperatura superficial del mar tienen un efecto en la distribución y abundancia

variations in the parameters due to the effect of stochasticity (noise) in the model and uncertainty in the parameters related to the effect of the process error.

With regard to the Pacific sardine fishery, it has been suggested that changes in the sea surface temperature patterns affect the distribution and abundance of the sardine within the California Current (Lluch-Belda *et al.*, 1989, 1991). The acceptance of the process error hypothesis considers many differences with respect to the apparent cause of the effects that indirectly affect the fit of Ricker's (1975) model. Although natural

de la sardina dentro de la Corriente de California (Lluch-Belda *et al.*, 1989, 1991). La aceptación de la hipótesis del error de proceso considera varias diferencias con respecto a la causa aparente de los efectos que pueden estar influyendo de manera indirecta en el ajuste del modelo de Ricker (1975). Aunque para la sardina se reconocen variaciones cíclicas de manera natural (Baumgartner *et al.*, 1992), en el caso de este trabajo no se interpreta la influencia del ambiente como una variación aleatoria, sino que prueba una hipótesis sobre el posible estado de la relación *stock*/reclutamiento analizando la estructura del error dentro y fuera del modelo, para posteriormente dar la opción de formular nuevas hipótesis biológicas dentro de modelos que consideren la incorporación de variabilidad ambiental a través de algún determinado factor físico, como la temperatura superficial del mar, índices de surgencia, vientos o cualquier otro. Es decir, en el caso de esta pesquería se confirma estadísticamente, a través de la modelación del error de proceso, la influencia de variaciones externas al modelo de *stock* y reclutamiento de Ricker (1975) dentro de la estimación del reclutamiento de *S. sagax caeruleus*.

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer a Antonio Díaz de León, Presidente del INP, y Pablo Arenas, Director de Pesquerías del INP, su apoyo para cursar una estancia académica en la Escuela de Pesquerías de la Universidad de Washington. Este trabajo fue desarrollado con la asesoría de Ray Hilborn y Billy Ernst. Agradezco a Francisco Arreguín-Sánchez y dos revisores anónimos sus comentarios, así como al personal del laboratorio de edad y crecimiento del CICIMAR.

REFERENCIAS

- Armstrong, M.J. and Shelton, P.A. (1988). Bias in estimation of stock-recruitment function parameters caused by nonrandom environmental variability. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 45: 554–557.
- cyclical variations have been reported for the sardine (Baumgartner *et al.*, 1992), in this study environmental effects are not interpreted as random variations. Instead they prove a hypothesis on the possible state of the stock-recruitment relationship by analyzing the error structure within and outside the model, and provide the option of formulating new biological hypotheses with models that incorporate environmental variability through some determined physical factor, such as sea surface temperature, indices of upwelling and wind, among others. For this fishery, the process error model statistically confirms the influence of external variations on Ricker's (1975) stock-recruitment model for the recruitment estimates of *S. sagax caeruleus*.
- ACKNOWLEDGEMENTS**
- I wish to thank Antonio Díaz de León, President of INP, and Pablo Arenas, Director of Fisheries of INP, for their support during an academic leave to the School of Fisheries of the University of Washington. This study was developed with guidance from Ray Hilborn and Billy Ernst. I thank Francisco Arreguín-Sánchez and two anonymous reviewers for their comments, as well as the staff at the age and growth laboratory of CICIMAR.
- English translation by Jennifer Davis.
- Baumgartner, T., Soutar, A. and Ferreira-Bartrina, V. (1992). Reconstruction of the history of Pacific sardine and northern anchovy populations over the past two millenia from sediments of the Santa Barbara Basin, California. *CalCOFI Rep.*, 33: 24–40.
- Cisneros-Mata, M.A., Nevárez-Martínez, M.O. and Hammann, M.G. (1995). The rise and fall of the Pacific sardine, *Sardinops sagax caeruleus* Girard, in the Gulf of California, Mexico. *CalCOFI Rep.*, 36: 136–143.
- Cisneros-Mata, M.A., Brey, T., Jarre-Teichmann, A., García-Franco, W. y Montemayor-López, G. (1996). Redes de neuronas artificiales para el pronóstico de biomasa de sardina del Pacífico y

- de su medio ambiente. *Ciencias Marinas*, 22(4): 427–442.
- Deriso, R.B., Quinn II, T.J. and Neal, P.R. (1985). Catch-age analysis with auxiliary information. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 42: 815–824.
- Félix-Uraga, R. (1986). Edad, crecimiento y estructura poblacional de *Sardinops sagax* en Bahía Magdalena, de 1981 a 1984. Tesis de maestría, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, IPN, México, 103 pp.
- Félix-Uraga, R., Alvarado-Castillo, R.M. and Carmona-Piña, R. (1996). The sardine fishery along the western coast of Baja California, 1981 to 1994. *CalCOFI Rep.*, 37: 188–192.
- Fournier, D. and Archibald, C.P. (1982). A general theory for analyzing catch at age data. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 39: 1195–1207.
- Freeman, S.N. and Kirkwood, G.P. (1995). On a structural time series method for estimating stock biomass and recruitment from catch and effort data. *Fish. Res.*, 22: 77–98.
- Gayanilo, F.C., Soriano, M. and Pauly, D. (1989). A draft guide to the complete ELEFAN. ICLARM Software 2.70. International Center for Living Aquatic Resources Management, Manila, Philippines, 70 pp.
- Hilborn, R. and Walters, C. (1992). *Quantitative Fisheries Stock Assessment. Choice, Dynamics and Uncertainty*. Chapman-Hall, New York, 570 pp.
- Huato-Soberanis, L. and Lluch-Belda, D. (1987). Mesoscale cycles in the series of environmental indices related to the sardine fishery in the Gulf of California. *CalCOFI Rep.*, 28: 128–134.
- Lluch-Belda, D., Crawford, R.J.M., Kawasaki, T., MacCall, A.D., Parrish, R.H., Schwartzlose, R.A. and Smith, P.E. (1989). World-wide fluctuations of sardine and anchovy stocks: the regime problem. *S. Afr. J. Mar. Sci.*, 8: 195–205.
- Lluch-Belda, D., Lluch-Cota, D.B., Hernández-Vázquez, S., Salinas-Zavala, C.A. and Schwartzlose, R.A. (1991). Sardine and anchovy spawning as related to temperature and upwelling in the California Current system. *CalCOFI Rep.*, 32: 105–111.
- Lluch-Belda, D., Lluch-Cota, D.B., Hernández-Vázquez, S. and Salinas-Zavala, C.A. (1992a). The recovery of the California sardine as related to global change. *CalCOFI Rep.*, 33: 50–59.
- Lluch-Belda, D., Lluch-Cota, D.B., Hernández-Vázquez, S. and Salinas-Zavala, C.A. (1992b). Sardine population expansion in eastern boundary systems of the Pacific Ocean as related to sea surface temperature. *S. Afr. J. Mar. Sci.*, 12: 147–155.
- Ludwig, D. and Walters, C. (1981). Measurement errors and uncertainty in parameter estimates for stock and recruitment. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 38: 711–720.
- Megrey, B.A. (1989). Review and comparison of age-structured stock assessment models from theoretical and applied points of view. *Am. Fish. Soc. Symp.*, 6: 8–48.
- Method, R.D. (1989). Synthetic estimates of historical abundance and mortality for northern anchovy. *Am. Fish. Soc. Symp.*, 6: 66–82.
- Polacheck, T., Hilborn, R. and Punt, A.E. (1993). Fitting surplus production models: comparing methods and measuring uncertainty. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 50: 2597–2607.
- Punt, A.E. and Hilborn, R. (1996). *Biomass Dynamic Models. User's Manual*. FAO Computerized Information Ser. (Fisheries), No. 10, 62 pp.
- Ricker, W.E. (1975). Computation and interpretation of biological statistics of fish populations. *Bull. Fish. Res. Bd. Canada*, 191: 382 pp.
- Schnute, J. (1991). The importance of noise in fish population models. *Fish. Res.*, 11: 197–223.
- Walters, C. and Ludwig, D. (1981). Effects of measurement errors on the assessment stock-recruitment relationships. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 38: 704–710.