

A regular pattern of periodicity in the monthly catch of jumbo squid (*Dosidicus gigas*) along the Chilean coast (2002–2005)

Un patrón de periodicidad regular en las capturas mensuales de jibia (*Dosidicus gigas*) a lo largo de la costa de Chile (2002–2005)

MJ Zúñiga¹, LA Cubillos^{1*}, C Ibáñez^{1, 2}

¹ Laboratorio Evaluación de Poblaciones Marinas (EPOMAR), Departamento de Oceanografía, Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción, Chile. * E-mail: lucubillos@udec.cl

² Instituto de Ecología y Biodiversidad, Departamento de Ciencias Ecológicas, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile, Casilla 653, Santiago, Chile.

Abstract

A regular seasonal pattern of periodicity was detected in monthly catch data for *Dosidicus gigas* during the most recent period of high abundance of the species off Chile. Monthly catch data covering from 2002 to 2005 were grouped into three large zones, and the trend of the time series was removed by using loess smoother. The residuals between the original and the loess trend curve were computed and analyzed using autocorrelation and cross-correlation at different lags, and a trigonometric model was fitted to detect seasonal oscillation. A coherent pattern in the short-term monthly residuals was observed in the three time series, revealing a similar underlying process in the catch data, with a six-month cycle. We postulate that the seasonal and interannual fluctuations observed in the catch records could be related to the reproductive success of the species through the average occurrence of two reproductive cycles per year, and hence the generation of two cohorts per year.

Key words: *Dosidicus gigas*, catch data, seasonal pattern, Chile.

Resumen

Se detectó un patrón de periodicidad estacional en los datos mensuales de captura de *Dosidicus gigas* a lo largo de la costa chilena, durante el más reciente periodo de gran abundancia de la especie en la región. Los datos de capturas mensuales, que cubren de 2002 a 2005, fueron agrupados en tres grandes regiones, donde la tendencia de cada serie de tiempo fue eliminada utilizando un suavizador “loess”. Se calcularon los residuales entre la curva original y la tendencia “loess”, y éstos se analizaron utilizando técnicas de autocorrelación y correlación cruzada con diferentes retrasos de tiempo, así como a través del ajuste de un modelo trigonométrico para detectar oscilaciones estacionales. Se observó un patrón coherente en los residuales mensuales de corto plazo, revelando un proceso similar subyacente en los datos de captura, con un ciclo de 6 meses. Se postula que las fluctuaciones estacionales e interanuales observadas en los registros de captura podrían estar relacionadas con el éxito reproductivo de la especie a través de la ocurrencia de dos ciclos reproductivos por año, y de aquí la generación de dos cohortes por año en promedio.

Palabras clave: *Dosidicus gigas*, datos de captura, patrón estacional, Chile.

Introduction

The jumbo squid *Dosidicus gigas* (Orbigny 1835) is one of the most abundant ommastrephid squids in the eastern Pacific Ocean. It has been described as an important component of the tropical ecosystem, particularly in the upwelling system off Peru and in the Gulf of California where it exhibits higher relative abundance (Anderson and Rodhouse 2001, Argüelles *et al.* 2001, Nigmatullin *et al.* 2001, Markaida and Sosa-Nishizaki 2003, Díaz-Uribe *et al.* 2006, Bazzino *et al.* 2007).

Like most of the well-known cephalopods, the ommastrephid populations show a high variability in their abundance (Boyle and Boletzky 1996, Anderson and Rodhouse 2001, Taipei *et al.* 2001), mainly due to their biological characteristics such as fast growth, early maturation, short life, higher

Introducción

La jibia *Dosidicus gigas* (Orbigny 1835) es uno de los calamares ommastrephidos más abundantes en el océano Pacífico Oriental, y se ha descrito como un componente importante del ecosistema tropical, particularmente en el sistema de surgencia de Perú y en el Golfo de California, donde exhibe la mayor abundancia relativa (Anderson y Rodhouse 2001, Argüelles *et al.* 2001, Markaida y Sosa-Nishizaki 2003, Nigmatullin *et al.* 2001, Díaz-Uribe *et al.* 2006, Bazzino *et al.* 2007).

Como la mayoría de los cefalópodos conocidos, las poblaciones de ommastrephidos muestran una gran variabilidad en su abundancia (Anderson y Rodhouse 2001, Boyle y Boletzky 1996, Taipei *et al.* 2001) debido principalmente a sus características biológicas tales como rápido crecimiento, maduración

migratory capacity, and complex recruitment patterns (Boyle and Boletzky 1996). These features have allowed the omastrephid populations to inhabit zones characterized by wide oceanographic regimes in oceanic and coastal waters, as well as in tropical and temperate waters (Anderson and Rodhouse 2001). In the Gulf of California, growth and natural mortality of *D. gigas* vary among seasons, and the cohorts show high interannual variability in the annual fishing mortality, annual exploitation rate, recruitment, and average abundance (Nevárez-Martínez *et al.* 2006, Bazzino *et al.* 2007). In Peruvian and Chilean waters, it has been postulated that two cohorts of *D. gigas* could explain significant changes in the length structure between seasons (Argüelles *et al.* 2001, Tafur *et al.* 2001, Chong *et al.* 2005, Ibáñez and Cubillos 2007).

Off Chile, *D. gigas* exhibits low-frequency eruptions of high abundance, and for this reason Fernández and Vásquez (1995) classified it as an ephemeral fishery. It must be mentioned that there is no fishery oriented towards *D. gigas* in Chile, and the last high period of abundance was reported based on the by-catch of traditional demersal and pelagic fisheries operating in coastal and oceanic waters. According to Rocha and Vega (2003), between 1960 and 1972 a maximum annual catch of 3000 t was reported in 1964, whereas from 1973 to 1990 catches of only 1–9 t were recorded. A period of high abundance occurred between 1992 and 1994 (Rocha and Vega 2003), and recently a new period of high abundance of *D. gigas* has occurred off Chile since 2002, with a total catch of 15,000 t in 2003 and 248,000 t in 2005. Catch data can be considered questionable as representative of abundance because several factors influence the catch; however, since there is no fishery targeting jumbo squid in Chile, fishing effort data are not available to obtain catch per unit effort. The species has been caught mainly as by-catch by small-scale and industrial fleets fishing for pelagic and demersal fish resources. Indeed, because *D. gigas* is a short-living species (Argüelles *et al.* 2001, Nigmatullin *et al.* 2001, Markaida *et al.* 2004), it is assumed that abundant or poorly recruited cohorts can be detected by fishermen and are therefore reflected rather quickly in the catch.

The recent increment in the catch of *D. gigas* off Chile that occurred between 2002 and 2005 could be associated with the reproductive success of the species in local waters, or to irregular massive invasions into southern peripheries of the central range of the species distribution as suggested by Nigmatullin *et al.* (2001). According to these authors, these invasions could be due to active feeding migrations during years of high abundance. In this paper, the monthly periodicity in the catch records for the Chilean coast was analyzed. The objective was to infer a regular pattern that could be related to biological characteristics of the species, such as reproductive success or regular migrations.

temprana, vida corta, alta capacidad migratoria, y complejos patrones de reclutamiento (Boyle y Boletzky 1996). Estas características han permitido a las poblaciones de omastrephidos habitar en zonas caracterizadas por regímenes oceanográficos amplios en aguas oceánicas y costeras, así como en aguas tropicales y templadas (Anderson y Rodhouse 2001). En el Golfo de California el crecimiento y la mortalidad natural de *D. gigas* varía entre las estaciones del año, y las cohortes muestran una gran variabilidad interanual en la mortalidad por pesca, en la tasa de explotación anual, en el reclutamiento y en la abundancia media (Nevárez-Martínez *et al.* 2006, Bazzino *et al.* 2007). Para aguas peruanas y chilenas se ha postulado que dos cohortes de *D. gigas* podrían explicar los cambios significativos que se observan en la estructura de longitudes entre estaciones del año (Argüelles *et al.* 2001, Tafur *et al.* 2001, Chong *et al.* 2005, Ibáñez y Cubillos 2007).

Frente de Chile, aunque con poca frecuencia, *D. gigas* muestra episodios de gran abundancia, por lo que su pesquería ha sido clasificada por Fernández y Vásquez (1995) como efímera. Cabe mencionar que en Chile no existe una pesquería orientada hacia *D. gigas*, y el último periodo de gran abundancia ha sido reportado a partir de la fauna acompañante de las pesquerías demersales y pelágicas tradicionales que operan tanto en aguas costeras como oceánicas. Según Rocha y Vega (2003), entre 1960 y 1972, se obtuvo una captura máxima anual de 3000 t (en 1964), mientras que de 1973 a 1990 sólo se registraron capturas entre 1 y 9 t. Entre 1992 y 1994 ocurrió un periodo de gran abundancia (Rocha y Vega 2003), y recientemente desde 2002 se ha presentado un nuevo periodo de gran abundancia de *D. gigas* frente a las costas de Chile, alcanzando capturas totales de 15,000 t en 2003 y de 248,000 t en 2005. Los datos de captura pueden ser cuestionables como representativos de la abundancia ya que varios factores influyen sobre la captura. Sin embargo, dado que en Chile no hay una pesquería orientada a la jibia, los datos de esfuerzo de pesca no están disponibles para obtener la captura por unidad de esfuerzo. La especie ha sido capturada principalmente como fauna acompañante por las flotas artesanal e industrial que pescan otros recursos pesqueros pelágicos y demersales. De hecho, como *D. gigas* es una especie de vida corta (Argüelles *et al.* 2001, Nigmatullin *et al.* 2001, Markaida *et al.* 2004), se asume que los pescadores pueden detectar rápidamente cohortes abundantes o pobremente reclutadas y, por consiguiente, éstas pueden verse reflejadas bastante bien en la captura.

El reciente incremento en la captura de *D. gigas* frente a Chile, ocurrido entre 2002 y 2005, podría asociarse al éxito reproductivo de la especie en aguas locales, o a invasiones irregulares masivas hacia el sur desde el rango central de distribución de la especie, tal como lo sugiere Nigmatullin *et al.* (2001). Según estos autores, tales invasiones podrían ser debidas a migraciones alimentarias activas durante años de gran abundancia. En este trabajo se analizó la periodicidad mensual en la captura registrada a lo largo de la costa chilena. El objetivo es inferir un patrón regular que podría relacionarse con las

Material and methods

Monthly catch data from January 2002 to December 2005 were used. These data were obtained from the official catch statistics reported by the Chilean Fisheries Service. Time series of the catch data were grouped into three zones: north zone (18°20'–25°20' S), central zone (25°20'–33°00' S), and south zone (33°00' S–43°00' S) (fig. 1). The time series analyzed here only covers 48 months, but it is considered sufficient to detect a regular monthly periodicity. Furthermore, before 2002 catch data were nil, therefore the time series used here represents the recent increment in the re-appearance of the jumbo squid off Chile.

The simplest representation of a pattern in abundance or productivity is a temporal increase or decrease (Spencer and Collie 1997). To assess the trend in the catch data, loess smoother (Cleveland 1979) was applied to each data set by using a smoothing window (span = 0.8, degree = 1) times the dataset length. The “gam” package (Hastie and Tibshirani 1990) for the R language and software (Ihaka and Gentleman 1996) was used to fit the loess trend to the data. The residuals between the original and smoothed data are defined here as the short-term, i.e. monthly, variation. After removing the overall trend in the catch data, the residuals between the original and smoothed data were analyzed to detect periodicity and association among the time series. The autocorrelation function (ACF) was applied to the residuals to detect the correlated structure of the time series at different lag (maximum lag used was 36 months). The cross-correlation function was also applied to detect probable dependence between the time series. The “stats” package for R (Ihaka and Gentleman 1996) was used to compute the autocorrelation and cross-correlation functions.

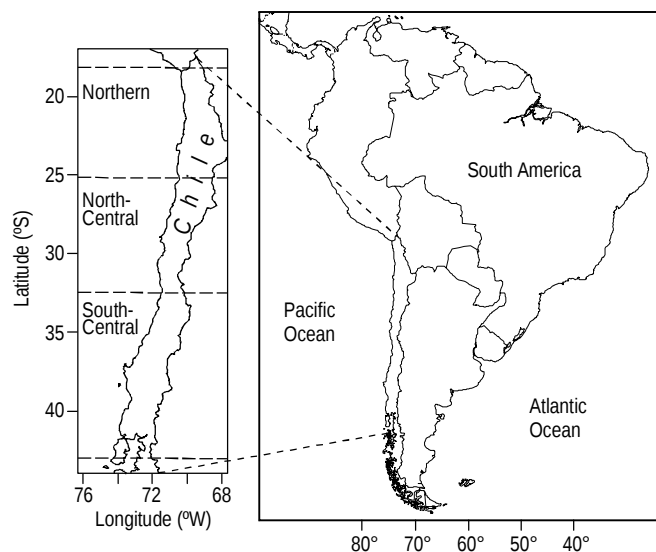


Figure 1. Study area showing the three zones into which the *Dosidicus gigas* catch data were grouped.

Figura 1. Área de estudio mostrando las tres zonas en las cuales los datos de captura de *Dosidicus gigas* fueron agrupados.

características biológicas de la especie, tales como el éxito reproductivo o migraciones regulares.

Materiales y métodos

Se usaron datos mensuales de captura que cubren de enero de 2002 a diciembre de 2005, y que fueron obtenidos de las estadísticas de captura oficiales del Servicio Nacional de Pesca de Chile. Las series de tiempo de los datos de captura se agruparon en tres zonas: zona norte (18°20'–25°20' S), zona central (25°20'–33°00' S), y zona sur (33°00' S–43°00' S) (fig. 1). Las series de tiempo que aquí se analizan cubren sólo 48 meses, tiempo considerado suficiente para detectar una periodicidad regular mensual. Además, antes de 2002 los datos de la captura eran nulos, por consiguiente la serie de tiempo que aquí se usó está representando el reciente incremento en la aparición de la jibia frente a Chile.

La representación más simple de un patrón en abundancia o productividad es un incremento o disminución temporal (Spencer y Collie 1997). Para evaluar la tendencia en los datos de la captura, se aplicó un suavizador “loess” (Cleveland 1979) a cada conjunto de datos usando una ventana suavizadora (span = 0.8, grado = 1) a la longitud de la base de datos. Se utilizó el paquete “gam” (Hastie y Tibshirani 1990) para lenguaje y software R (Ihaka y Gentleman 1996) para ajustar la tendencia “loess” a los datos. Los residuos entre el dato original y la tendencia suavizada fueron definidos aquí como de corto plazo, es decir la variación mensual. Después de quitar la tendencia global a los datos de captura, los residuos entre los datos originales y suavizados se analizaron para detectar periodicidad y asociación entre la serie de tiempo. Se aplicó la función de autocorrelación (ACF) a los residuos para detectar la estructura correlacionada de la serie de tiempo en diferentes retrasos (el máximo retraso usado fue de 36 meses). También se aplicó la función de la correlación cruzada para detectar una probable dependencia entre las series de tiempo. Se utilizó el paquete “stats” para R (Ihaka y Gentleman 1996) para calcular las funciones de autocorrelación y correlación cruzada.

Finalmente, la periodicidad regular se evaluó utilizando un modelo trigonométrico de acuerdo con Astudillo y Caddy (1988) y Arancibia *et al.* (1995), i.e.

$$\log(Y_t + 1) = \alpha_t + A\alpha_t \cos(tn\pi + \phi) \quad (1)$$

donde Y_t es la captura en el mes t ($t = 1$ para enero de 2002, ..., $t = 48$ para diciembre de 2005), α_t es la tendencia “loess” de cada serie de tiempo, A es la amplitud del ciclo, n y ϕ son constantes relacionadas con la fase. Los parámetros A , n y ϕ fueron estimados por regresión no lineal en el paquete “nls” de Venables y Ripley (2002) para el lenguaje y software R (Ihaka y Gentleman 1996).

Resultados

En el periodo de 2002 a 2005 los registros de captura de *D. gigas* revelaron cambios concurrentes a lo largo de la costa

Finally, regular periodicity was assessed by using a trigonometric model according to Astudillo and Caddy (1988) and Arancibia *et al.* (1995):

$$\log(Y_t + 1) = \alpha_t + A\alpha_t \cos(tn\pi + \phi) \quad (1)$$

where Y_t is the catch at month t ($t = 1$ for January 2002, ..., $t = 48$ for December 2005), α_t is the loess trend of each time-series, A is the amplitude of the cycle, and n and ϕ are constants related to the phase. The parameters A , n and ϕ were estimated using nonlinear regression in the “nls” package of Venables and Ripley (2002) for the R language and software (Ihaka and Gentleman 1996).

Results

During the period 2002–2005, the *D. gigas* catch records revealed concurrent changes along the Chilean coast (fig. 2). According to the catch level, the most important catches occurred in the central and south zones during 2004 and 2005, and lower catches were recorded in the north zone. In spite of the magnitude of the catch in those three zones, the log-transformed catch data showed a stationary time series in the north zone, along with a monotonic increment from 2002 to 2004 in the central zone catch data and a sigmoid increment in the south zone catch data. The trends were well detected by the loess technique for each time series (table 1). Off northern Chile, a positive trend was observed. In the central zone an initial positive trend was also observed, but after May 2004 (month 29) the monthly catch tended to decline. In the south zone a sigmoid trend was obtained from January 2002 to December 2005 (fig. 3).

The monthly variation, in terms of the residuals between the original log-transformed catch data and the loess trend, showed concurrent changes (fig. 4). Although there were differences in residuals in given months, particularly at the end of the time series (i.e., 2004–2005), a similar regular pattern of monthly fluctuation was detected by applying an autocorrelation function. In fact, the autocorrelation function

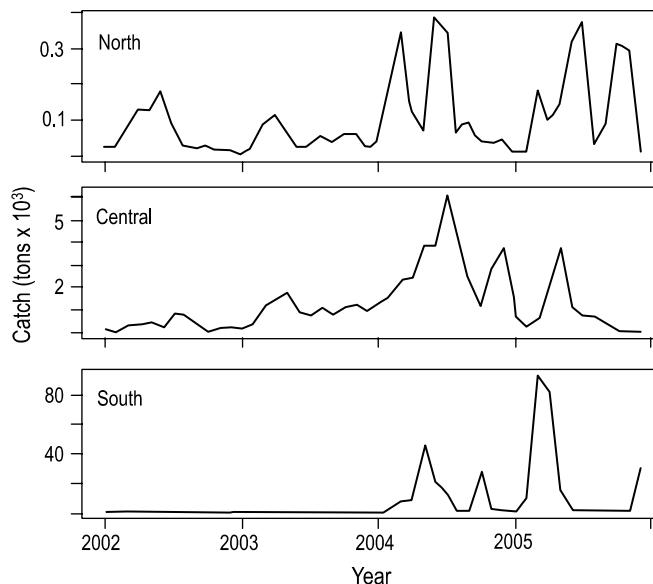


Figure 2. Monthly time series of *Dosidicus gigas* catch along the Chilean coast (January 2002 to December 2005).

Figura 2. Series de tiempo mensuales de capturas de *Dosidicus gigas* a lo largo de la costa chilena (enero de 2002–diciembre de 2005).

chilena (fig. 2). Según el nivel de captura, las capturas más importantes ocurrieron en la zona sur y central durante 2004 y 2005, y las capturas más bajas fueron registradas en la zona norte. A pesar de la magnitud de la captura en esas tres zonas, los datos de captura transformados a logaritmo mostraron una serie de tiempo estacionaria en la zona norte, junto con un incremento monótono de 2002 a 2004 en los datos de la captura de la zona centro, y un incremento sigmoideo en los datos de captura de la zona sur. Las tendencias fueron bien detectadas mediante la técnica “loess” para cada serie de tiempo (tabla 1). Frente al norte de Chile se observó una tendencia positiva. En cambio, en la zona centro se observó también una tendencia positiva al comienzo, pero después de mayo de 2004 (mes 29) la captura mensual tendió a declinar. En la zona sur se obtuvo una tendencia sigmoidea desde enero de 2002 a diciembre de 2005 (fig. 3).

Table 1. Trend analysis of the log-transformed catch data for *Dosidicus gigas*. The intercept represents the overall mean and $\log(\text{Time}, \text{span} = 0.8)$ is the loess smooth term. The standard error of the parameter is shown in parentheses (* $P < 0.01$).

Tabla 1. *Dosidicus gigas*, análisis de tendencia de los datos de captura transformados a logaritmo. El intercepto representa la media global, y $\log(\text{Time}, \text{span} = 0.8)$ es el término de suavizamiento loess. El error estándar de los parámetros se muestra entre paréntesis, df = grados de libertad, p = probabilidad, AIC = Criterio de información de Akaike, N = número de datos.

	North zone	Central zone	South zone
Intercept	3.520* (0.347)	6.249* (0.341)	3.425* (0.454)
$\log(\text{Time}, \text{span} = 0.8)$	0.022 (0.012)	0.007 (0.012)	0.121* (0.016)
Null deviance	69.894, d.f. = 47	117.374, d.f. = 47	273.350, d.f. = 47
Residual deviance	64.383, d.f. = 46	62.216, d.f. = 46	110.350, d.f. = 46
Akaike's information criterion	156.32	154.68	182.18
Number of data-points	48	48	48

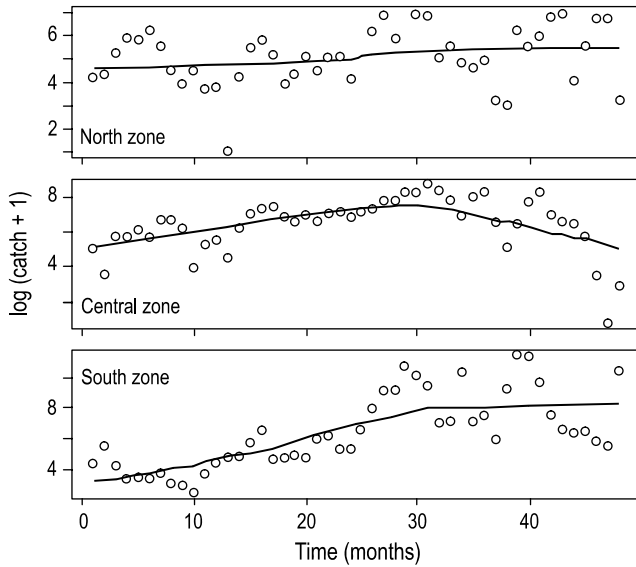


Figure 3. Loess trend analysis of the log-transformed catch data for *Dosidicus gigas* along the Chilean coast (January 2002 to December 2005).

Figura 3. Análisis de la tendencia loess de los datos de captura de *Dosidicus gigas* transformados a logaritmo, a lo largo de la costa chilena (enero de 2002–diciembre de 2005).

revealed significant autocorrelation at lag = one month, and changes approximately every six months (fig. 5). The cross-correlation function showed a dependence among the three zones, with a significant cross-correlation at lag = 0 between the north and central zones, at lag = 1 and 2 between the north and south zones, and at lag = 1, 2 and 3 between the central and south zones (fig. 6).

The periodicity in the behavior of the monthly variation, as assessed with the periodical nonlinear regression method, revealed a similar amplitude and phase for the three zones (table 2). The parameters of the trigonometric model fitted to each time series were significant ($P < 0.01$), and the models

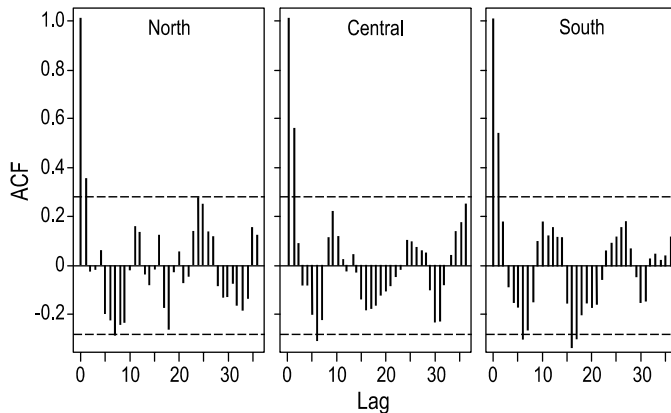


Figure 5. Autocorrelation function of the catch residuals along the Chilean coast.

Figura 5. Función de autocorrelación de los residuales de captura a lo largo de la costa chilena.

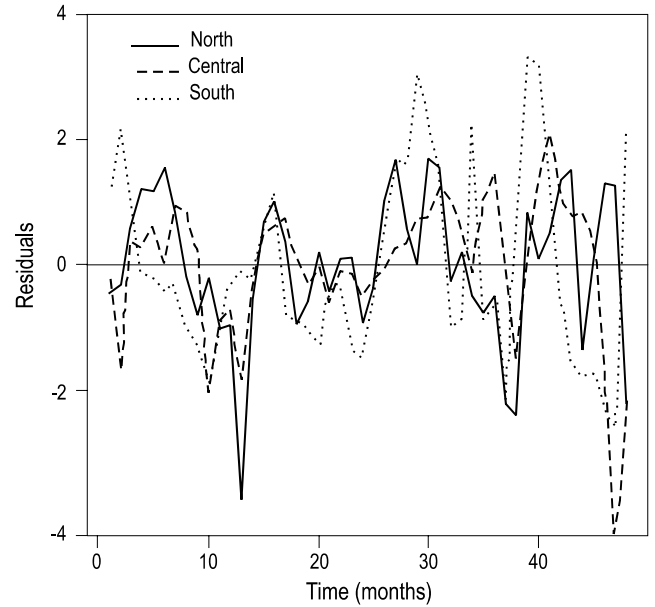


Figure 4. Residuals between the original and loess trend of the log-transformed catch data for *Dosidicus gigas* along the Chilean coast (January 2002 to December 2005).

Figura 4. Residuales entre los datos originales y la tendencia loess de la captura de *Dosidicus gigas* transformada a logaritmo, a lo largo de la costa chilena (enero de 2002–diciembre de 2005).

La variación mensual, por lo que se refiere a los residuos entre los datos originales de captura y la tendencia loess (transformados a logaritmo), muestra cambios concurrentes (fig. 4). Aunque hubo diferencias en los residuos de algunos meses, particularmente al final de la serie de tiempo (i.e. 2004 a 2005), se detectó un patrón regular de fluctuación mensual al aplicar la función de autocorrelación. De hecho, la función de autocorrelación reveló una correlación significativa en un retraso de 1 mes, y cambios cada seis meses aproximadamente (fig. 5). La función de correlación cruzada mostró una dependencia entre las tres zonas, con una correlación cruzada significativa sin retraso (lag = 0) entre las zonas norte y centro,

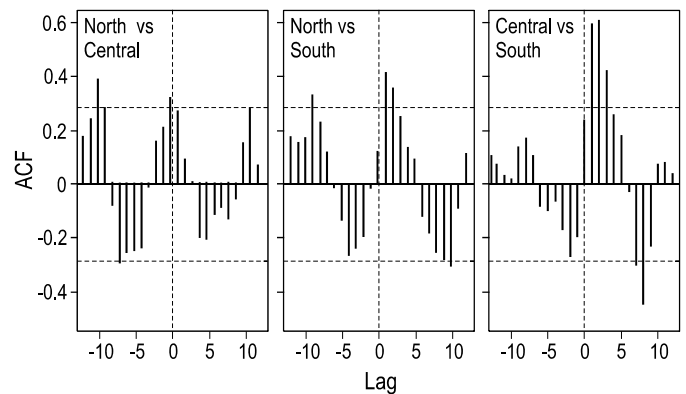


Figure 6. Cross-correlation function of the *Dosidicus gigas* catch residuals along the Chilean coast.

Figura 6. Función de correlación cruzada de los residuales de captura de *Dosidicus gigas* a lo largo de la costa chilena.

Table 2. Parameters of the trigonometric model fitted to the monthly residuals of the *Dosidicus gigas* catch data. The standard error of the parameters is shown in parentheses (* $P < 0.01$).

Tabla 2. *Dosidicus gigas*, parámetros del modelo trigonométrico ajustado a los residuals mensuales de los datos de captura. El error estándar de los parámetros se muestra entre paréntesis.

Parameter	North zone	Central zone	South zone
A	0.226* (0.051)	0.130* (0.032)	0.202* (0.038)
n	0.160* (0.005)	0.168* (0.006)	0.167* (0.005)
ϕ	3.751* (0.463)	3.166* (0.543)	4.365* (0.527)
Residual standard error	0.997	1.003	1.225
Number of data-points	48	48	48

described well the changes observed in the monthly catch data (fig. 7). However, the monthly periodicities showed greater similarities between the north and central zones. In fact, the north and central zones presented a delayed response with respect to the south zone, but in the three zones a similar underlying process was observed in the *D. gigas* catch data, with a cycle of six months (fig. 8).

Discussion

Strong interannual variability has been observed in the historical catch data series of *D. gigas* in the Gulf of California (Bazzino *et al.* 2007) and in Peruvian waters (Tafur *et al.* 2001, Waluda *et al.* 2006), while captures of this species off Chile have been rather sporadic (Rocha and Vega 2003). Some authors suggest that the causes of the interannual variability in the *D. gigas* catch could be related to changes in environmental

y retrasos de 1 y 2 meses entre las zonas norte y sur, y en retrasos de 1, 2 y 3 meses entre las zonas centro y sur (fig. 6).

La periodicidad en la conducta de la variación mensual, evaluada con el método de regresión no lineal periódico, reveló amplitud y fase similares para las tres zonas (tabla 2). Los parámetros del modelo trigonométrico ajustado a cada serie de tiempo fueron significativos ($P < 0.01$), y los modelos describieron bien los cambios observados en los datos de captura mensuales (fig. 7). Sin embargo, las periodicidades mensuales fueron más similares entre las zonas norte y centro que con la zona sur. De hecho, las zonas norte y centro presentaron una respuesta retardada con respecto a la zona sur, pero en las tres zonas se observa un proceso subyacente similar en los datos de la captura de *D. gigas* con un ciclo de 6 meses (fig. 8).

Discusión

Se ha observado una fuerte variabilidad interanual en las series de datos de capturas históricas de *D. gigas* en el Golfo de California (Bazzino *et al.* 2007), así como también en aguas peruanas (Tafur *et al.* 2001, Waluda *et al.* 2006), mientras que en Chile las capturas de *D. gigas* han sido más bien esporádicas (Rocha y Vega 2003). Algunos autores sugieren que las causas de la variabilidad interanual en las capturas de *D. gigas* podrían estar relacionadas con cambios en las condiciones ambientales (Névarez-Martínez *et al.* 2002, Markaida 2006, Waluda *et al.* 2006), o con cambios en migraciones alimentarias activas, patrones reproductivos o con el éxito del reclutamiento (Ehrhardt *et al.* 1983, Nigmatullin *et al.* 2001). A pesar de la variabilidad interanual en los datos de captura, se ha observado un claro patrón estacional de *D. gigas* en el Golfo de California (Markaida 2006) y frente a Perú (Waluda *et al.* 2006). En este trabajo se encontró también una periodicidad estacional en la variación mensual de la captura de *D. gigas* a lo largo de la costa chilena, incluso en la presencia de tendencias y magnitudes interanuales diferentes de la captura entre las zonas. De hecho, las diferencias en la magnitud y tendencia en los datos de la captura están obscureciendo el patrón estacional aquí encontrado a través de los residuos mensuales de captura de *D. gigas*. En las tres zonas, la captura de esta especie tiende a ser mayor durante abril a julio (otoño del hemisferio del sur) y menor durante octubre a diciembre, lo que configura un ciclo

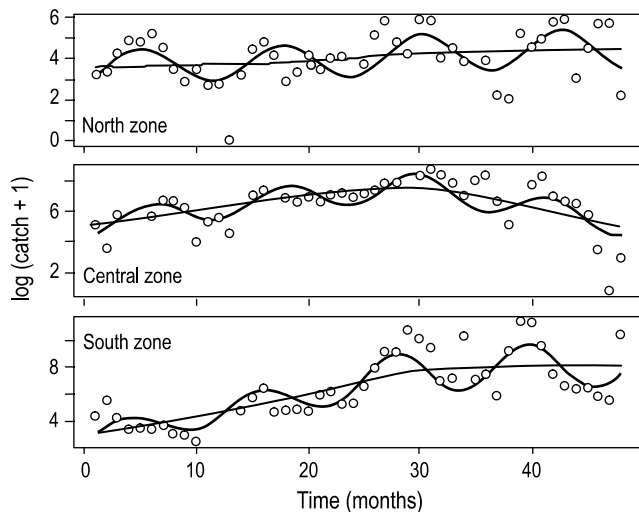


Figure 7. Regular periodicity model fitted to the log-transformed catch data for *Dosidicus gigas* along the Chilean coast (January 2002 to December 2005).

Figure 7. Modelo de periodicidad regular ajustado a los datos de captura de *Dosidicus gigas* transformados a logaritmo, a lo largo de la costa chilena (enero de 2002–diciembre de 2005).

conditions (Nevárez-Martínez *et al.* 2002, Markaida 2006, Waluda *et al.* 2006) or to changes in active feeding migrations, reproduction patterns or recruitment success (Ehrhardt *et al.* 1983, Nigmatullin *et al.* 2001). Despite the interannual variability in catch data, a clear seasonal pattern has been observed for *D. gigas* in the Gulf of California (Markaida 2006) and off Peru (Waluda *et al.* 2006). In this study, we also found a seasonal periodicity in the monthly variation of the *D. gigas* catch along the Chilean coast, even in the presence of different interannual trends and differences in the magnitude of the catch among zones. Indeed, differences in the magnitude and trend in catch data are obscuring the seasonal pattern found here through monthly residuals of the *D. gigas* catch. In the three zones, the catch of this species tended to be higher from April to July (autumn in the Southern Hemisphere) and lower from October to December, configuring a six-month cycle as revealed by the autocorrelation function. This seasonal pattern could be related to biological characteristics of the species, particularly to regular biological processes occurring within a yearly cycle. The most relevant seasonal processes could thus be related to probable seasonal active feeding migrations (Nigmatullin *et al.* 2001) and/or to the reproductive cycle and subsequent seasonal recruitment pattern (González and Chong 2006, Díaz-Urbe *et al.* 2006).

In terms of the reproductive cycle, Nesis (1970, 1983) suggested that spawning occurs during spring and summer in the Southern Hemisphere. Clarke and Paliza (2000) postulated the existence of two spawning periods within a year for *D. gigas* in the Southern Hemisphere, one of the peaks occurring in autumn (April–May) and the other in spring (October–November). In Peruvian waters, Tafur *et al.* (2001) also suggested that the main spawning peak tends to occur between October and January, with a secondary peak between July and August; nevertheless, mature individuals were observed throughout the year. Tafur *et al.* (2001) also indicated that a recruitment index showed a peak in winter and a secondary peak in summer (Southern Hemisphere). In the Gulf of California, Ehrhardt *et al.* (1983) concluded that *D. gigas* is a stock composed of multiple cohorts, which migrate separately on some occasions, but with recruitment to the main fishing grounds occurring around May each year. Díaz-Urbe *et al.* (2006) give support to the hypothesis of multiple cohorts because they found large variability in the maturity index, which is indicative of asynchronous maturation of the oocytes in the female gonad. Though mature specimens have been observed throughout the year, the peak of maturity appears to prevail from May to October in the Gulf of California (Bazzino *et al.* 2007). On the other hand, Morales-Bojórquez *et al.* (2001) estimated catchability-at-length for *D. gigas* and communicated the existence of three different cohorts off the coast of Guaymas (Sonora, Mexico). In Chilean waters, González and Chong (2006) recently analyzed maturation of *D. gigas* specimens, and postulated the presence of at least two cohorts of the species to explain differences in the maturation of specimens observed between winter and spring.

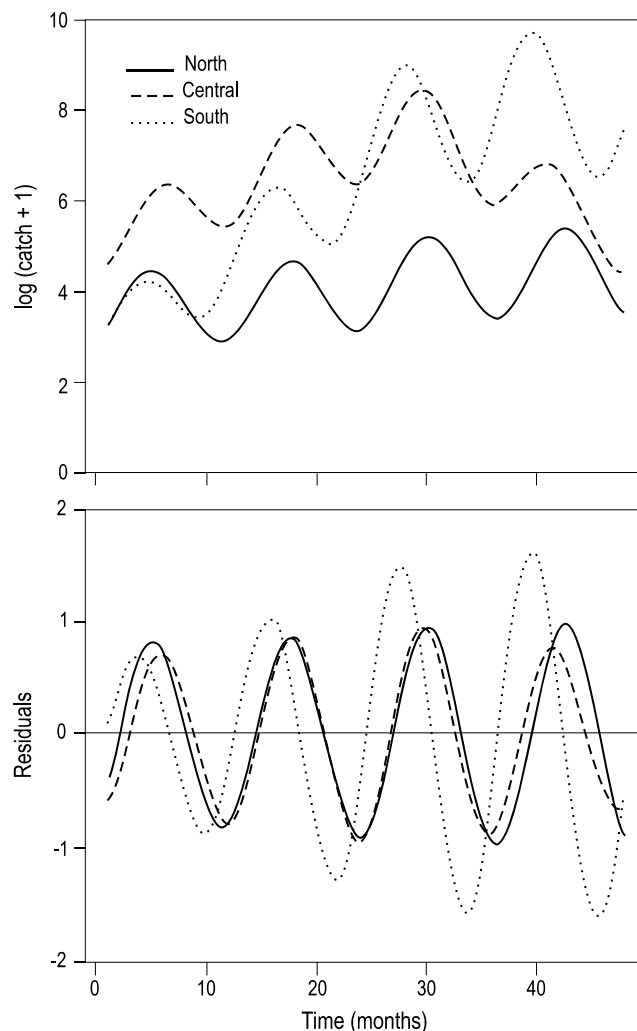


Figure 8. Monthly regular periodicity detected in the *Dosidicus gigas* catch data along the Chilean coast (January 2002 to December 2005).

Figure 8. Periodicidad regular mensual detectada en los datos de captura de *Dosidicus gigas* a lo largo de la costa chilena (enero de 2002–diciembre de 2005).

de 6 meses como fue detectado en la función de autocorrelación. Este modelo estacional podría estar relacionado con las características biológicas de la especie, particularmente con procesos biológicos regulares que ocurren dentro de un ciclo anual. De esta manera, los procesos estacionales más relevantes podrían estar relacionados con probables migraciones alimentarias activas estacionales (Nigmatullin *et al.* 2001), y/o con el ciclo reproductivo y el patrón de reclutamiento estacional subsiguiente (González y Chong 2006, Díaz-Urbe *et al.* 2007).

Por lo que se refiere al ciclo reproductivo, Nesis (1970, 1983) ha sugerido que el desove ocurre durante la primavera y el verano en el hemisferio del sur. Clark y Paliza (2000) postularon la existencia de dos periodo de desove dentro de un año para *D. gigas* en el hemisferio del sur, con uno de los picos en otoño (abril–mayo) y otro secundario en primavera entre

We found a regular pattern in the seasonal periodicity of the catch of *D. gigas* along the Chilean coast. In correspondence with the two spawning periods that have been reported for the species, it could be hypothesized that the seasonal and interannual fluctuations observed in the catch records could be related to reproductive success through the average occurrence of two reproductive cycles per year, and hence the generation of two cohorts per year independently of the magnitude of this recruitment pattern. The existence of two cohorts per year has also been inferred from length-frequency data by Chong *et al.* (2005) and Ibáñez and Cubillos (2007). Probably, one of the cohorts dominates in abundance and produces the seasonal pattern observed in the catch data.

In terms of seasonal active feeding migrations of *D. gigas* along the Chilean coast, Nigmatullin *et al.* (2001) have postulated that this species expands its horizontal distribution from the central eastern Pacific towards the north (Alaska) and to southern Chile during high abundance periods. Our results suggest a delayed response in the catch residuals along the Chilean coast. In fact, taking into account the cross-correlation function, among zones there is a delayed response only with the south zone, and this pattern is also evident in the results obtained with the trigonometric model of periodicity. If active seasonal migrations are the main process underlying the catch data, then the process could start in the south zone and be observed one to three months later in the central and north zones. This statement contradicts that postulated by Nigmatullin *et al.* (2001), and further research is required to analyze probable migrations along the Chilean coast. In the meantime, we postulate that the underlying regular seasonal process observed in the catch data seems to be associated with the existence of two reproductive periods and the subsequent recruitment pattern consisting of the generation of two cohorts per year on average.

Acknowledgements

We thank H Arancibia and M Pedraza for their collaboration and help in reviewing the results contained in our research, as well as M Gálvez for providing the catch data used in this paper. We are grateful to an anonymous reviewer whose comments helped to significantly improve this paper.

References

- Anderson CIH, Rodhouse PG. 2001. Life cycles, oceanography and variability: Ommastrephid squid in variable oceanographic environments. *Fish. Res.* 54: 133–143.
- Arancibia H, Alarcón R, Cubillos L, Arcos D. 1995. A landing forecast for horse mackerel, *Trachurus symmetricus murphyi* (Nichols, 1920) off central Chile. *Sci. Mar.* 59: 113–117.
- Argüelles J, Rodhouse PG, Villegas P, Castillo G. 2001. Age, growth and population structure of the jumbo flying squid *Dosidicus gigas* in Peruvian waters. *Fish. Res.* 54: 51–61.
- Astudillo A, Caddy JF. 1988. Periodicidad de los desembarcos de merluza (*Merluccius merluccius*) y salmonete (*Mullus* sp.) en la isla de Mallorca. In: Wyatt T, Larrañeta MG (eds.), *International*
- octubre–noviembre. En Perú, Tafur *et al.* (2001) también sugirieron que el pico de desove principal tiende ocurrir entre octubre y enero, con un pico secundario entre julio y agosto. Tafur *et al.* (2001) también señalaron que un índice de reclutamiento mostró un pico en invierno y uno secundario en verano (hemisferio sur). En el Golfo de California Ehrhardt *et al.* (1983) concluyeron que el stock de *D. gigas* está compuesto por cohortes múltiples que migran separadamente en algunas ocasiones, pero el reclutamiento a las zonas de pesca principales tiende a ocurrir alrededor de mayo cada año. Díaz-Urbe *et al.* (2007) apoyaron la hipótesis de cohortes múltiples porque encontraron una gran variabilidad en el índice de madurez, lo que indica maduración asincrónica de los oocitos en la gónada de la hembra. Aunque se han observado especímenes maduros a lo largo del año, en el Golfo de California el máximo de madurez parece prevalecer de mayo a octubre (Bazzino *et al.* 2007). En cambio, Morales-Bojórquez *et al.* (2001) comunicaron la existencia de tres cohortes diferentes frente a la costa de Guaymas, Sonora, estimando la capturabilidad a cada longitud de *D. gigas*. En aguas chilenas, recientemente González y Chong (2006) analizaron la maduración de especímenes de *D. gigas* y postularon la presencia de por lo menos dos cohortes de la especie para explicar las diferencias en la maduración de los especímenes observada entre invierno y primavera.
- Nosotros encontramos un patrón regular en la periodicidad estacional de la captura de *D. gigas* a lo largo de la costa chilena. En correspondencia con los dos periodos de desove que se han informado para la especie podría suponerse que la fluctuación estacional e interanual observada en los registros de captura podría relacionarse con el éxito reproductivo a través de la ocurrencia media de dos ciclos reproductivos por año, y de aquí la generación de dos cohortes por año independientemente de la magnitud de este patrón de reclutamiento. La existencia de dos cohortes por año también ha sido inferida de los datos de frecuencia de longitud de Chong *et al.* (2005) e Ibáñez y Cubillos (2007). Probablemente una de las cohortes domina en la abundancia y produce el patrón estacional observado en los datos de la captura.
- Por lo que se refiere a las migraciones alimentarias activas estacionales de *D. gigas* a lo largo de la costa chilena, Nigmatullin *et al.* (2001) han postulado que esta especie extiende su distribución horizontal desde el Pacífico oriental central hacia el norte (Alaska) y sur de Chile durante periodos de gran abundancia. Nuestros resultados hacen pensar en una respuesta retardada en los residuos de la captura a lo largo de la costa chilena. De hecho, teniendo en cuenta la función de correlación cruzada, solamente hay una respuesta retardada entre las zonas con la zona sur, mismo que también es evidente en los resultados obtenidos con el modelo de periodicidad trigonométrico. Si las migraciones estacionales activas son el principal proceso subyacente en los datos de captura, entonces el proceso podría empezar en la zona sur y ser observado uno a tres meses después en las zonas centro y norte. Este argumento es contradictorio con lo postulado por Nigmatullin *et al.* (2001), y exige investigar más las probables migraciones a lo largo de la costa

- Symposium on Long-Term Changes in Marine Fish Populations, Vigo, 1986, pp. 221–234.
- Bazzino G, Salinas-Zavala C, Markaida U. 2007. Variability in the population structure of jumbo squid (*Dosidicus gigas*) in Santa Rosalía, central Gulf of California. *Cienc. Mar.* 33: 173–186.
- Boyle P, Boletzky S. 1996. Cephalopod populations: Definitions and dynamics. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B* 351: 985–1002.
- Chong J, Oyarzún C, Galleguillos R, Tarifeño E, Sepúlveda RD, Ibáñez CM. 2005. Parámetros biológico-pesqueros de la jibia, *Dosidicus gigas* (Orbigny, 1835) (Cephalopoda: Ommastrephidae) frente a la costa de Chile central (29°S y 40°S) durante el período 1993–1994. *Gayana (Concepción)* 69: 319–328.
- Clarke R, Paliza O. 2000. The Humboldt Current squid *Dosidicus gigas* (Orbigny, 1835). *Rev. Biol. Mar. Oceanogr.* 35: 1–39.
- Cleveland WS. 1979. Robust locally weighted regression and soothing scatterplots. *J. Am. Stat. Assoc.* 74: 829–836.
- Díaz-Urbe JG, Hernández-Herrera A, Morales-Bojórquez E. 2006. Histological validation of the gonadal maturation stages of female jumbo squid (*Dosidicus gigas*) in the Gulf of California, Mexico. *Cienc. Mar.* 32: 23–31.
- Ehrhardt NM, Jacquemin P, García F, González G, López J, Ortiz J, Solís A. 1983. On the fishery and biology of the giant squid *Dosidicus gigas* in the Gulf of California, Mexico. In: Caddy JF (ed.), *Advanced in Assessment of World Cephalopod Resources*. FAO Fish. Tech. Pap. 231, Rome, pp. 306–340.
- Fernández F, Vásquez JA. 1995. La jibia gigante *Dosidicus gigas* (Orbigny, 1835) en Chile: Análisis de una pesquería efímera. *Estud. Oceanol.* 14: 17–21.
- González P, Chong J. 2006. Biología reproductiva de *Dosidicus gigas* D'Orbigny 1835 (Cephalopoda, Ommastrephidae) en la zona norte-centro de Chile. *Gayana* 70: 65–72.
- Hastie T, Tibshirani R. 1990. *Generalized Additive Models*. Chapman and Hall, New York, 559 pp.
- Ibáñez CM, Cubillos LA. 2007. Seasonal variation in the length structure and reproductive condition of jumbo squid *Dosidicus gigas* (d'Orbigny, 1835) off central-south Chile. *Sci. Mar.* 71: 123–128.
- Ihaka R, Gentleman R. 1996. R: A language for data analysis and graphics. *J. Comp. Graph. Stat.* 5: 299–314.
- Markaida U. 2006. Food and feeding of jumbo squid *Dosidicus gigas* in the Gulf of California and adjacent waters after the 1997–98 El Niño event. *Fish. Res.* 79: 16–27.
- Markaida U, Sosa-Nishizaki O. 2003. Food and feeding habits of jumbo squid *Dosidicus gigas* (Cephalopoda: Ommastrephidae) from the Gulf of California, Mexico. *J. Mar. Biol. Assoc. UK* 83: 1–16.
- Markaida U, Quiñónez-Velásquez C, Sosa-Nishizaki O. 2004. Age, growth and maturation of jumbo squid *Dosidicus gigas* (Cephalopoda: Ommastrephidae) from the Gulf of California, Mexico. *Fish. Res.* 66: 31–47.
- Morales-Bojórquez E, Martínez-Aguilar S, Arreguín-Sánchez F, Nevárez-Martínez MO. 2001. Estimations of catchability-at-length for the jumbo squid (*Dosidicus gigas*) fishery in the Gulf of California, Mexico. *CalCOFI Rep.* 42: 167–171.
- Nesis KN. 1970. The biology of the giant squid of Peru and Chile, *Dosidicus gigas*. *Okeanologiya* 10: 140–152.
- chilena. Por mientras, nosotros postulamos que el proceso estacional regular subyacente en los datos de captura parece más relacionado con la existencia de dos periodos reproductivos y con el patrón de reclutamiento subsiguiente que consiste en la generación de dos cohortes por año en promedio.

Agradecimientos

Agradecemos a Hugo Arancibia y Milton Pedraza por su colaboración y ayuda en la revisión de los resultados de nuestra investigación. Gracias también a M Gálvez por proveer los datos de captura utilizados en este trabajo. Estamos agradecidos de los revisores anónimos cuyos comentarios fueron esenciales para mejorar este trabajo.

- Nesis KN. 1983. *Dosidicus gigas*. In: Boyle PR (ed.), *Cephalopod Life Cycles*. Vol. I. Species Accounts. Academic Press, London, pp. 215–231.
- Nevárez-Martínez MO, Rivera-Parra GI, Morales-Bojórquez E, López-Martínez J, Lluch-Belda DB, Miranda-Mier E, Cervantes-Valle C. 2002. The jumbo squid *Dosidicus gigas* fishery of the Gulf of California and its relation to environmental variability. In: Salinas S, Urban JH, Arntz WE (eds.), *Extended Abstracts of the El Niño Symposium & Workshop*. *Invest. Mar.* 30: 193–194.
- Nevárez-Martínez MO, Méndez-Tenorio FJ, Cervantes-Valle C, López-Martínez J, Anguiano-Carrasco ML. 2006. Growth, mortality, recruitment, and yield of the jumbo squid (*Dosidicus gigas*) off Guaymas, Mexico. *Fish. Res.* 79: 38–47.
- Nigmatullin CM, Nesis KN, Arkhipkin AI. 2001. A review of the biology of the jumbo squid *Dosidicus gigas* (Cephalopoda: Ommastrephidae). *Fish. Res.* 54: 9–19.
- Rocha F, Vega VM. 2003. Overview of the cephalopod fisheries in Chilean waters. *Fish. Res.* 60: 151–159.
- Rodhouse PG. 2001. Managing and forecasting squid fisheries in variable environments. *Fish. Res.* 54: 3–8.
- Spencer PD, Collie JS. 1997. Patterns of population variability in marine fish stocks. *Fish. Oceanogr.* 6: 188–204.
- Tafur R, Villegas P, Rabí M, Yamashiro C. 2001. Dynamics of maturation, seasonality of reproduction and spawning grounds of the jumbo squid *Dosidicus gigas* (Cephalopoda: Ommastrephidae) in Peruvian waters. *Fish. Res.* 54: 33–50.
- Taipe A, Yamashiro C, Mariategui L, Rojas P, Roque C. 2001. Distribution and concentrations of jumbo flying squid (*Dosidicus gigas*) off the Peruvian coast between 1991 and 1999. *Fish. Res.* 54: 21–32.
- Venables WN, Ripley BD. 2002. *Modern Applied Statistics with S*. 4th ed. Springer-Verlag, New York.
- Waluda CM, Yamashiro C, Rodhouse PG. 2006. Influence of the ENSO cycle on the light-fishery for *Dosidicus gigas* in the Peru Current: An analysis of remotely sensed data. *Fish. Res.* 79: 56–63.

Recibido en abril de 2007;
aceptado en diciembre de 2007.