

Caracterización multiescala de la temperatura del mar en una zona de bancos de abulón (*Haliotis* spp.) en Bahía Asunción, Baja California Sur, México

Multiscale characterization of the sea temperature in an area of abalone banks (*Haliotis* spp.) at Bahía Asunción, Baja California Sur, Mexico

Germán Ponce-Díaz^{1,2*}
Salvador E. Lluch-Cota¹
J. Jesús Bautista-Romero¹
Daniel Lluch-Belda²

¹ Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
Mar Bermejo #195
Col. Playa Palo de Santa Rita
Apartado postal 128
La Paz, CP 23090, Baja California Sur, México
*E-mail: gponce@cibnor.mx

² Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas
Terrenos “El Conchalito” s/n
La Paz, Baja California Sur, México

Recibido en marzo de 2002; aceptado en abril de 2003

Resumen

La pesquería de abulón en Baja California es una de las más importantes en México debido a su alto valor comercial. A pesar de diversos esfuerzos de manejo, esta pesquería ha sufrido cambios drásticos que han sido atribuidos principalmente a la sobrepesca y a la variabilidad del clima marino. El presente trabajo analiza la variabilidad de la temperatura del mar en la región de Bahía Asunción, BCS, a escalas temporales que pueden afectar procesos biológicos del abulón tales como mortalidad, reproducción, reclutamiento y crecimiento individual, entre otros. El estudio se basa en diferentes fuentes de información. Se presenta el ciclo circadiano tipo y sus variaciones a lo largo del año y entre años para el periodo 1997–2000, el ciclo estacional y desviaciones interanuales para el periodo 1992–2000, la variabilidad a escala decadal sobre la base de valores anuales promedio del periodo 1959–1997 y el comportamiento de largo plazo con datos de todo el Siglo XX. Adicionalmente, se presenta un análisis de densidad espectral donde se estimaron los valores de contribución porcentual de cada región espectral (escala temporal) a la señal de variabilidad completa. Los resultados de variaciones de alta frecuencia (circadiana a interanual) sugieren una relación entre los ciclos reproductivos y de variación térmica, un efecto potencial negativo de los fenómenos ENSO de gran intensidad sobre las postlarvas de abulón con menor tolerancia a altas temperaturas, así como un efecto diferencial de la temperatura sobre juveniles de diferentes especies. Respecto de la baja frecuencia (decadal a siglo), es evidente que los años recientes representan una condición mucho más cálida que la que persistió durante las décadas anteriores, lo que sugiere estados diferentes de las comunidades biológicas en la región. En el área de estudio es notoria la ausencia de información sobre aspectos del clima marino, particularmente acerca de mediciones finas o de alta frecuencia.

Palabras clave: *Haliotis*, temperatura superficial del mar, Bahía Asunción, variabilidad climática, ENSO.

Abstract

The Baja California abalone is one of the most important Mexican fisheries because of its high economic value. Despite strong management efforts, this fishery has faced dramatic fluctuations attributed mainly to overfishing and variability of the marine climate. In this report we analyze sea temperature variability off Bahía Asunción, Baja California Sur (Mexico), at temporal scales that may affect abalone biological processes, such as mortality, reproduction, recruitment, and individual growth rate. Since the analysis is based on different data sources, we conducted a series of correlation analyses to determine the coherence between them. We report the average daily cycle and its variations throughout the year and between years for the period 1997–2000, the seasonal cycle and interannual deviations for the period 1992–2000, the behavior of the decadal scale variability based on annual values for the period 1959–1997, and the long-term trends after analyzing the entire 20th century. Furthermore, we conducted a spectral density analysis to estimate the proportional contribution of each temporal scale to the entire variability signal. Results from the high-frequency variability (daily to interannual) suggest a relationship between

temperature and the abalone reproductive cycles, a potential negative effect of the very strong ENSO events on the postlarvae, and a differential effect of temperature on juveniles of different species. Regarding the low-frequency variability (decadal to century), we show that recent years represent a much warmer period compared to previous decades, suggesting a different biological community structure between periods. The spectral density analysis indicates seasonal variability as the major contributor to the regional variability, followed by the interannual (related to ENSO). There is almost no information of the marine climate in this region, particularly in regard to fine and high-resolution observations. This contribution will provide new quantitative elements for studies dealing with the ecology of these coastal productive systems.

Key words: *Haliotis*, sea surface temperature, Bahía Asunción, climate variability, ENSO.

Introducción

Los abulones son gasterópodos marinos bentónicos que viven desde la zona intermareal hasta los 30–40 m de profundidad (Guzmán-del Prío, 1992). Estos organismos habitan en zonas rocosas entre bosques de macroalgas y asociados a una comunidad de gran riqueza específica. Las especies de abulón de mayor talla se encuentran en zonas que presentan corrientes con aguas frías y templadas a lo largo de las costas continentales donde predominan las algas café (Cox, 1962).

En México la producción pesquera de abulón de los últimos años ha oscilado alrededor de las 350–400 t anuales de callo, con un valor estimado entre 17 y 36 millones de dólares (Ponce-Díaz *et al.*, 1998; INP, 2000). En años recientes la pesquería mexicana de abulón ha sufrido una disminución drástica de sus capturas (INP, 2000). Esta situación se ha relacionado con procesos de sobrepesca (Breen, 1992; Guzmán-del Prío 1992; Prince y Guzmán-del Prío 1993); sin embargo, alternativamente se ha propuesto la idea de que los bajos rendimientos de esta pesquería podrían ser explicados en parte por la variabilidad del clima marino (Guzmán-del Prío, 1994; Vega *et al.*, 1995; Lluch-Belda *et al.*, 1997; Shepherd *et al.*, 1998; Ponce-Díaz *et al.*, 2000).

La temperatura ambiental ha sido señalada como uno de los factores importantes que influyen en la distribución y abundancia de los organismos. Se han mencionado patrones y cambios de largo plazo de la variabilidad interanual dentro del sistema de la Corriente de California, la cual tiene influencia en el área de distribución del recurso abulón (Lluch-Belda *et al.*, 2001). Por ejemplo, en Bahía Magdalena, ubicada al sur de la Península de Baja California, se ha observado que los cambios de temperatura se asocian a eventos intra e interanuales y presentan una considerable magnitud de cambio, lo que implica que las especies que habitan esta región deben estar adaptadas a muy diferentes condiciones térmicas (Lluch-Belda *et al.*, 2000).

En ese sentido, es importante analizar la variabilidad del clima marino en términos de los cambios de la temperatura del mar a las diferentes escalas temporales (circadianas, estacionales, interanuales y de largo plazo) a que están expuestos los recursos pesqueros, en este caso el abulón. Tales cambios de temperatura pueden tener consecuencias sobre procesos biológicos que inciden en la productividad del recurso, tales como mortalidad, reproducción, reclutamiento y crecimiento individual, entre otros.

Introduction

Abalones are benthic marine gastropods found from the intertidal zone to 30–40 m depth (Guzmán-del Prío, 1992). These organisms inhabit rocky areas among macroalgal forests and are associated with a community of great specific richness. The large-sized abalone species are found in areas where cold- and warm-water currents occur along the continental coasts dominated by brown algae (Cox, 1962).

In Mexico, during the past few years the abalone fishery has produced about 350–400 t annually of meat, with an estimated value of 17–36 million US dollars (Ponce-Díaz *et al.*, 1998; INP, 2000). In recent years, the catches of this species have decreased considerably (INP, 2000). This has been mainly attributed to overfishing (Breen, 1992; Guzmán-del Prío, 1992; Prince and Guzmán-del Prío, 1993); however, another explanation that has been tendered for the low yields is the variability of the marine climate (Guzmán-del Prío, 1994; Vega *et al.*, 1995; Lluch-Belda *et al.*, 1997; Shepherd *et al.*, 1998; Ponce-Díaz *et al.*, 2000).

Ambient temperature is considered one of the important factors that affect the distribution and abundance of organisms. Patterns and long-term changes in the interannual variability have been reported for the California Current system, which influences the area of distribution of this resource (Lluch-Belda *et al.*, 2001). In Bahía Magdalena, for example, located in the southern Baja California Peninsula, the changes in temperature are associated with intra- and interannual events and the extent of variation is considerable; this indicates that the species found in this region must adapt to different thermal conditions (Lluch-Belda *et al.*, 2000).

It is therefore important to analyze the variability of the marine climate in terms of changes in sea temperature at different time scales (daily, seasonal, interannual and long-term) to which the fishery resources are exposed, in this case the abalone. Such changes in temperature may affect the biological processes that determine the productivity of the resource, such as mortality, reproduction, recruitment and individual growth, among others.

The present study characterizes the variability of sea temperature in the region of Bahía Asunción. Different variation cycles were analyzed, from the circadian to the decadal, including El Niño events, and the long-term trends for the 20th century were determined.

El presente trabajo muestra una caracterización de la variabilidad de la temperatura del mar en la región de Bahía Asunción, analizando diferentes ciclos de variación, desde los circadianos hasta los decadales, incluyendo eventos de El Niño, junto con una visión de largo plazo para identificar la tendencia general durante el siglo más reciente.

Área de estudio

Bahía Asunción (fig. 1) se encuentra enclavada en la parte central de la costa occidental de la Península de Baja California y presenta una línea costera en donde se alternan litorales rocosos con zonas de playa arenosa. A lo largo de este litoral ocurren especies de importancia comercial como el abulón y la langosta (Vega *et al.*, 1995; León-Carballo y Muciño-Díaz, 1996; Vega-Velázquez *et al.*, 1996). En la zona de Bahía Asunción, al menos, se tienen cuantificados 50 bancos en producción de *Haliotis fulgens* Philippi, 1854 y *H. corrugata* Wood, 1828 (Muñoz, 1976), en asociación con macroalgas de la especie *Eisenia arborea* Areschoug 1876 y, en menor grado, con *Macrocystis pyrifera* (L.) C. Agardh 1820, la cual está limitada a la región norte de esta área de estudio (Hernández-Carmona *et al.*, 2000).

La parte sur del área de estudio (en las inmediaciones de Punta San Hipólito) es considerada como una zona de surgencias temporales y de giros que propician altas producciones biológicas en estos litorales (Walsh *et al.*, 1974, 1977). De hecho, se ha documentado el papel que tienen los nutrientes provenientes de estos procesos oceanográficos sobre las poblaciones de macroalgas en la región de estudio (Hernández-Carmona *et al.*, 2000), mismas que son la fuente primordial de alimento para abulones.

En esta parte de la costa occidental de la Península de Baja California ocurren eventos oceanográficos que determinan que el área de estudio sea considerada como una zona de transición entre aguas templadas y tropicales y, por ende, una frontera provincial de varios grupos taxonómicos, incluyendo peces costeros, braquiuros, briozoarios y moluscos (Hewitt, 1981). Asimismo, esta porción de la costa occidental de la península ha sido caracterizada por la presencia de variaciones de periodo corto en la circulación anticiclónica, o giros oceánicos con intensificaciones o relajamientos de surgencias (Amador-Buenrostro *et al.*, 1995).

Material y métodos

Los datos de temperatura utilizados en este trabajo provienen de diversas fuentes:

- (a) Datos de temperatura *in situ* registrados cada hora o cada dos horas. Las mediciones se hicieron a una profundidad de entre 5 y 6 m, por medio de un termógrafo de registro continuo en un banco abulonero cercano a la Isla Asunción, a una distancia aproximada de 300 m de la línea de costa durante el periodo de 1997 a 2000 (Ponce-Díaz *et al.*, 2003).

Study area

Bahía Asunción (fig. 1) is located on the west coast of the central part of the Baja California Peninsula (Mexico). The coastline is rocky interspersed with sandy beaches, and provides habitat for commercially important species such as abalone and lobster (Vega *et al.*, 1995; León-Carballo and Muciño-Díaz, 1996; Vega-Velázquez *et al.*, 1996). In the region of Bahía Asunción, there are at least 50 banks of *Haliotis fulgens* Philippi, 1854 and *H. corrugata* Wood, 1828 (Muñoz, 1976), associated with macroalgae of the species *Eisenia arborea* Areschoug 1876 and, to a lesser extent, *Macrocystis pyrifera* (L.) C. Agardh 1820, which is limited to the northern part of the study area (Hernández-Carmona *et al.*, 2000).

Upwelling and eddies occur in the southern part of the study area, around Punta San Hipólito, creating favourable conditions for high biological productivity along the coast (Walsh *et al.*, 1974, 1977). The nutrients resulting from these oceanographic processes are important for the macroalgal populations in this region (Hernández-Carmona *et al.*, 2000), which in turn are the abalone's main source of food.

As a result of the oceanographic events that occur off the west coast of the Baja California Peninsula, the study area is considered to be a transition zone between temperate and

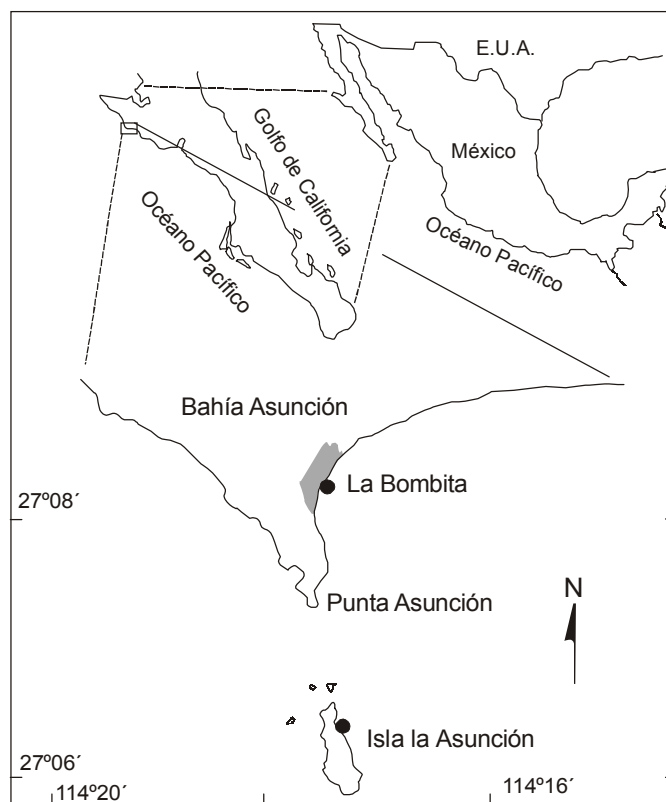


Figura 1. Área de estudio.
Figure 1. Study area.

- (b) Datos de temperatura superficial del mar registrados cada 24 h en el interior de Bahía Asunción, en el periodo de 1992 a 2000 (Ponce-Díaz *et al.*, 2003).
- (c) Datos de temperatura superficial del mar de una serie integrada y proporcionada por el Dr. Arthur V. Douglas (Department of Atmospheric Sciences, Creighton University, EUA), la cual consiste en registros mensuales para el cuadrante 115°–116° W y 27°–28° N, derivados a partir del análisis de regresión lineal múltiple entre mediciones de temperatura superficial del mar y datos de anillos de crecimiento de árboles (Douglas, 1976, 1980). Se utilizó esta información a partir 1959 y hasta 1997, años para los que se tienen datos sobre la pesquería de abulón en la zona de estudio.
- (d) Datos de temperatura superficial del mar de la base COADS (Comprehensive Ocean-Data Set/National Oceanic and Atmospheric Administration) con registros mensuales para el cuadrante contiguo a la zona de estudio (114°–116° W, 26°–28° N), que contiene información desde 1900 hasta 1996, y que son resultado de observaciones de muestreos directos con boyas oceanográficas y registros tomados en barcos de oportunidad (Woodruff *et al.*, 1993).

Análisis de datos

A partir de las fuentes de información básicas de temperatura del mar registrada con frecuencia horaria y cada 24 h, se realizó un análisis de correlación para determinar la correspondencia entre las series. Asimismo, se llevó a cabo este análisis entre los datos de mediciones de la temperatura superficial del mar realizadas cada 24 h y la serie de datos de temperatura mensual media de Douglas, y entre esta última y la serie de COADS.

Ciclo circadiano

El ciclo circadiano tipo se estimó a partir de los promedios de todos los valores horarios registrados por el termógrafo para 2000 y se ajustó un ciclo de dos armónicos. Posteriormente se calculó la forma en que varían los ciclos diarios a lo largo del año mediante los promedios de invierno (diciembre a febrero), primavera (marzo a mayo), verano (junio a agosto) y otoño (septiembre a noviembre) de 2000. Para cada caso se ajustó un ciclo.

Para evaluar la magnitud de los cambios en el ciclo circadiano que pueden esperarse entre años, se calculó el valor mensual promedio de amplitud del ciclo diario (valor máximo-mínimo) y se comparó con el valor estimado de amplitud sobre la base del año 2000.

Ciclo estacional

En la serie de mediciones de escala interanual se presentaron, al menos, dos eventos intensos de la Oscilación del Sur

tropical waters and, therefore, a provincial border for several taxonomic groups, including coastal fishes, brachiurans, bryozoans and molluscs (Hewitt, 1981). Likewise, this region has been characterized by the presence of short-term variations of the anticyclonic circulation or oceanic eddies with the intensification or relaxation of upwelling (Amador-Buenrostro *et al.*, 1995).

Material and methods

The temperature data used in this study were obtained from different sources:

- (a) *In situ* temperature data recorded every one or two hours. The measurements were done at a depth of 5–6 m with a continuous recording thermograph at an abalone bed near Isla Asunción, approximately 300 m from the coast, from 1997 to 2000 (Ponce-Díaz *et al.*, 2003).
- (b) Sea surface temperature data recorded every 24 h in the inner part of Bahía Asunción, from 1992 to 2000 (Ponce-Díaz *et al.*, 2003).
- (c) Sea surface temperature data from an integrated series provided by Dr. Arthur V. Douglas (Department of Atmospheric Sciences, Creighton University, USA). This series consists of monthly records for the 115°–116° W and 27°–28° N quadrant, derived from multiple linear regression analysis between sea surface temperature measurements and tree-ring data (Douglas, 1976, 1980). The information for the 1959–1997 period was used, as data for the abalone fishery in the study area are available for these years.
- (d) Mean monthly sea surface temperature data from the Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (COADS, National Oceanic and Atmospheric Administration) for the quadrant contiguous to the study area (114°–116° W, 26°–28° N), containing information from 1900 to 1996, obtained from direct sampling observations with oceanographic buoys and from ships of opportunity (Woodruff *et al.*, 1993).

Data analysis

Based on the different data sources, a correlation analysis was conducted to determine the coherence between the sea temperature measurements recorded hourly and every 24 h. This analysis was also done between the sea surface temperature measurements recorded every 24 h and Douglas's series of mean monthly temperature data, and between the latter and the COADS series.

Circadian cycle

The average daily cycle was estimated using the means of all the hourly values recorded by the thermograph for the

El Niño (ENSO, por sus siglas en inglés) durante el periodo de estudio (1992–1993 y 1997–1998); por esta razón los análisis de escala circadiana y estacional se realizaron tomando para todos los cálculos el año 2000 como referencia, ya que se puede considerar un año cercano a las condiciones medias de los años recientes.

La variabilidad estacional fue tratada mediante el promedio de los datos diarios de la variable registrada, de los que se obtuvieron los valores mensuales de temperatura del mar.

Variabilidad interanual

Los valores correspondientes a 2000 se ajustaron a un ciclo de dos armónicos, el cual se utilizó para estimar desviaciones o anomalías de la temperatura superficial del mar para el periodo 1992–2000.

Variabilidad de largo plazo

La variabilidad de largo plazo fue determinada mediante la utilización de los promedios anuales de la temperatura superficial del mar, derivados a partir de la base de datos de Douglas para el cuadrante $1^\circ \times 1^\circ$ más contiguo a la zona de estudio, y de la base COADS para el cuadrante $114^\circ\text{--}116^\circ\text{ W}$, $26^\circ\text{--}28^\circ\text{ N}$.

Dado que las anomalías de la serie Douglas están referidas al periodo 1959–1997, se calculó la relación entre éstas y las del cuadrante COADS, que cubre desde 1900 hasta 1996 ($r = 0.909^{**}$, $n = 41$), con una diferencia entre ambas de $+0.2827^\circ\text{C}$.

Partiendo de la información de COADS, para el análisis de la condición general de la zona con respecto a la variación de largo plazo se compararon las anomalías anuales obtenidas con las tendencias suavizadas mediante un filtro Hamming de 10 años, a lo largo del siglo, en el cuadrante seleccionado.

Análisis espectral

La serie Douglas, la cual coincide con los años de información de la pesquería de abulón en la zona, fue tratada mediante técnicas de series de tiempo para calcular la contribución relativa de las diferentes escalas de variabilidad a la señal completa de la serie. El procesamiento incluyó la eliminación de la media y la tendencia, la aplicación de un filtro pesado Hamming de 9 términos, y se estimaron las densidades espectrales derivadas de una transformación rápida de Fourier. Posteriormente, se agruparon los valores de densidad espectral para regiones definidas por su frecuencia: intraanual no estacional (< 11 meses); estacional (11–13 meses); oscilación *quasi*-bianual (QBO, por sus siglas en inglés) que incluye la alta frecuencia del ENSO (13–36 meses); ENSO (su baja frecuencia; 36–88 meses); decadal (88–180 meses); bidecadal (180–360 meses); y de muy baja frecuencia (> 360 meses). Para cada categoría se promediaron los valores de densidad espectral y se ponderaron sobre la base del recorrido correspondiente de las frecuencias. Finalmente, se estimaron

year 2000, fitted to a cycle of two harmonics. The variation of the daily cycles throughout the year was then determined, using the winter (December to February), spring (March to May), summer (June to August) and autumn (September to November) averages of 2000; one cycle was fitted for each case.

To determine the expected variations in the daily cycle between years, the mean monthly amplitude value of the daily cycle (maximum–minimum value) was calculated and compared with the amplitude value estimated for 2000.

Seasonal cycle

In the interannual series of measurements, at least two intense El Niño/Southern Oscillation (ENSO) events occurred during the study period (1992–1993 and 1997–1998); therefore, the data for 2000 were used as reference for the daily and seasonal analyses, as this year can be considered typical of the average conditions for recent years.

The seasonal variability was determined based on the average of the daily data of the variable recorded, from which the monthly sea temperature values were obtained.

Interannual variability

The values corresponding to the year 2000 were fitted to a cycle of two harmonics, which was used to estimate deviations or anomalies in the sea surface temperature for the period 1992–2000.

Long-term variability

The long-term variability was determined using the annual averages of sea surface temperature, derived from Douglas's data set for the $1^\circ \times 1^\circ$ quadrant contiguous to the study area and from COADS for the $114^\circ\text{--}116^\circ\text{ W}$, $26^\circ\text{--}28^\circ\text{ N}$ quadrant.

Since the anomalies of the Douglas series refer to the period 1959–1997, the relationship was determined between these data and those of COADS for the period 1900–1996 ($r = 0.909^{**}$, $n = 41$), with a difference of $+0.2827^\circ\text{C}$ between both.

Based on the information provided by COADS, for the analysis of the general condition of the area relative to the long-term variability, a comparison was made of the annual anomalies obtained with the trends smoothed using a 10-year Hamming filter for the century in the selected quadrant.

Spectral analysis

Time series techniques were applied to the Douglas series, which covers years for which data exist for the abalone fishery in the area, to estimate the proportional contribution of each temporal scale to the entire variability signal. The process includes the elimination of the mean and the trend, the application of a 9-weight Hamming filter, and the calculation

los valores de contribución porcentual de cada región espectral a la señal completa y se estimó de nueva cuenta eliminando el estacional.

Resultados

El análisis de correlación entre las mediciones de temperatura del mar, temperatura *in situ* y temperatura superficial del mar registradas de manera diaria en las inmediaciones de la Bahía Asunción, y su relación con la derivada de la serie Douglas y, a su vez, de ésta última con respecto a la de COADS, es estadísticamente significativa en todos los casos, por lo que el análisis llevado a cabo tiene un soporte adecuado.

En la figura 2 se muestran las series de datos de mediciones diarias y horarias en la zona de estudio. En ella se observa la presencia de dos eventos ENSO intensos, 1992–1993 y 1997–1998; el rango de la temperatura para las series oscila entre los 11°C y 29°C aproximadamente.

La relación funcional entre los datos del termógrafo de registro continuo y los datos tomados en la estación de registro diario en el interior de Bahía Asunción alcanza un coeficiente de correlación $r = 0.952$ con $n = 704$ (fig. 3a). La relación entre los datos de la serie histórica de Douglas y los registros diarios de temperatura (fig. 3b) muestra igualmente una correlación alta con un coeficiente $r = 0.909$ y con $n = 49$.

La variabilidad de la temperatura con una escala circadiana se analiza con una perspectiva anual y estacional. Se observa que tanto en invierno como en primavera se presenta un ciclo circadiano con dos máximos al día. En la estación de primavera se presentan las temperaturas del mar más bajas (fig. 4a, b).

Por otra parte, esta escala circadiana se analiza en términos de las variaciones en la amplitud de este ciclo con respecto a una comparación entre años (fig. 5). En 2000, la amplitud del ciclo diario varía estacionalmente de alrededor de 0.6°C en el

of the spectral densities derived from a fast Fourier transform. The spectral density values were then grouped into categories defined by their frequency: non-seasonal intra-annual (< 11 months); seasonal (11–13 months); quasi-biannual oscillation, including the high frequency of ENSO (13–36 months); ENSO (its low frequency, 36–88 months); decadal (88–180 months); bidecadal (180–360 months); and very low frequency (> 360 months). For each category, the spectral density values were averaged and weighted based on the period corresponding to the frequencies. Finally, the percentage of contribution of each spectral category to the entire signal was estimated, and estimated again eliminating the seasonal group.

Results

The correlation analysis between sea temperature measurements, *in situ* temperature measurements and sea surface temperature recorded daily in the area of Bahía Asunción, and the relation between the last and Douglas's data and, in turn, between the Douglas and COADS series, is statistically significant in all cases; hence, the analysis is adequately supported.

Figure 2 shows the data series of the daily and hourly measurements in the study area. The presence of two intense ENSO events (1992–1993 and 1997–1998) can be appreciated. Sea temperature ranged from 11°C to 29°C.

The relation between the thermograph data and the data recorded daily within Bahía Asunción presented a correlation coefficient of $r = 0.952$ and $n = 704$ (fig. 3a). The relation between Douglas's data and the daily temperature measurements (fig. 3b) also presented a high correlation, with a coefficient of $r = 0.909$ and $n = 49$.

The daily variability of temperature was analyzed from an annual and seasonal perspective. In winter as well as in spring, the circadian cycle presents two daily maxima. The lowest sea temperatures were recorded in spring (figs. 4a, b).

The daily cycle was also analyzed in terms of the variations of the amplitude of this cycle relative to a comparison between years (fig. 5). In 2000, the amplitude of the daily cycle varied seasonally from around 0.6°C in winter to around 1.5°C in summer; previously, the amplitudes were in general lower and constant throughout the year, especially during the 1997–1998 El Niño.

Both the seasonal pattern based on the 2000 data and the deviations of this pattern, considering the years from 1992 to 1999, are presented in figure 6. The lowest temperature was recorded in May and the highest in September (fig. 6a). The deviations of the series clearly show the presence of the 1992–1993 and 1997–1998 ENSO events, as well as the opposite phenomenon (La Niña) during 1999–2000 (fig. 6b).

In figure 7, the mean annual anomalies of the Douglas series are compared to those of the COADS series for the selected quadrant, with smoothed tendencies since the year 1900.

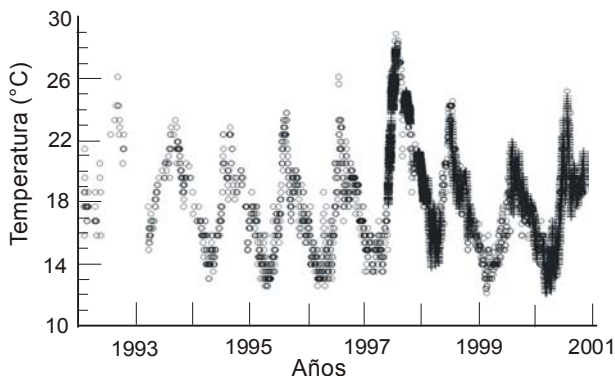


Figura 2. Series de temperatura del mar de alta frecuencia registradas en la zona de estudio. Temperatura superficial del mar registrada cada 24 horas (○). Temperatura del mar *in situ* (banco abulonero) registrada de forma horaria (+).

Figure 2. High-frequency sea temperature series for the study area. Sea surface temperature recorded every 24 h (○). *In situ* temperature (abalone bed) recorded every hour (+).

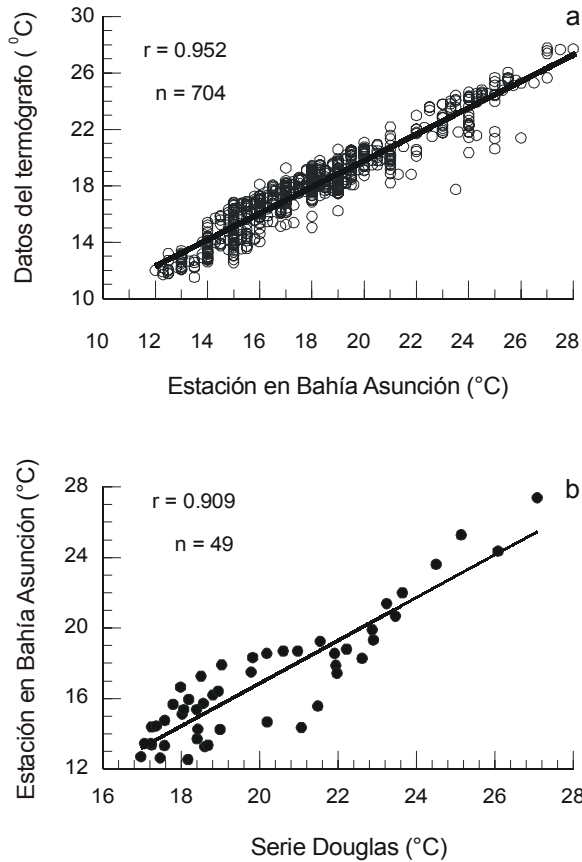


Figura 3. (a) Relación entre la temperatura superficial del mar registrada cada 24 horas y la temperatura del mar *in situ* (banco abulonero) registrada de forma horaria; (b) relación entre la temperatura superficial del mar registrada cada 24 horas y el promedio mensual de la temperatura del mar de la serie Douglas.

invierno hasta alrededor de 1.5°C en el verano, mientras que durante el periodo previo las amplitudes son, en general, más bajas y constantes a lo largo del año, especialmente durante El Niño 1997–1998.

Tanto el patrón estacional con base en los datos de 2000 como las desviaciones de este patrón, considerando los años de 1992–1999, se presentan en la figura 6. En la figura 6a se aprecia que la temperatura más baja se presentó durante el mes de mayo, mientras que la más alta ocurrió en septiembre. Por otra parte, en la figura 6b, de las desviaciones de la serie se observan con claridad la presencia de los eventos El Niño de 1992–1993 y 1997–1998, así como el fenómeno opuesto (La Niña) durante los años 1999–2000.

En la figura 7 se comparan las anomalías anuales medias entre la serie Douglas, ajustadas a la diferencia observada con respecto a la serie COADS del cuadrante seleccionado, sobre un marco general de tendencias suavizadas desde 1900.

En la figura 8 se aprecian los valores del periodograma y la contribución relativa de las señales de los componentes

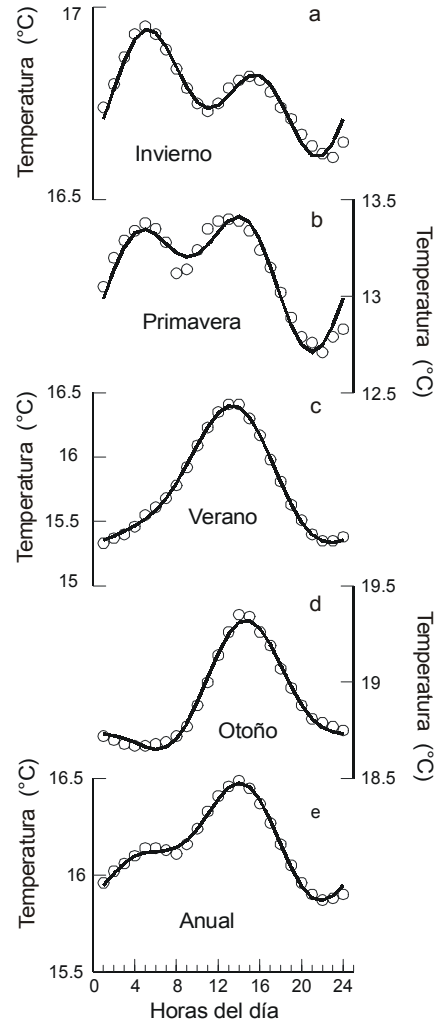


Figura 4. Ciclo circadiano de la temperatura del mar como promedio estacional: (a) invierno, (b) primavera, (c) verano, (d) otoño y (e) promedio anualizado.

Figura 4. Circadian cycle of sea temperature as seasonal average: (a) winter, (b) spring, (c) summer, (d) autumn, and (e) annualized average.

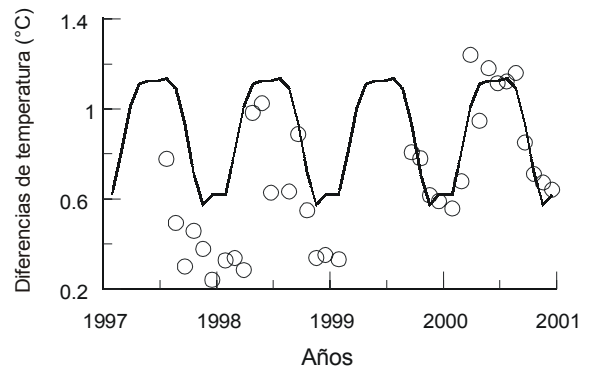


Figura 5. Comportamiento interanual de la amplitud del ciclo diario de la temperatura del mar. Valores obtenidos de los promedios mensuales (○). Ciclo ajustado para el año 2000 (—).

Figura 5. Interannual behaviour of the amplitude of the daily cycle of sea temperature. Values obtained from the monthly means (○). Cycle fitted for the year 2000 (—).

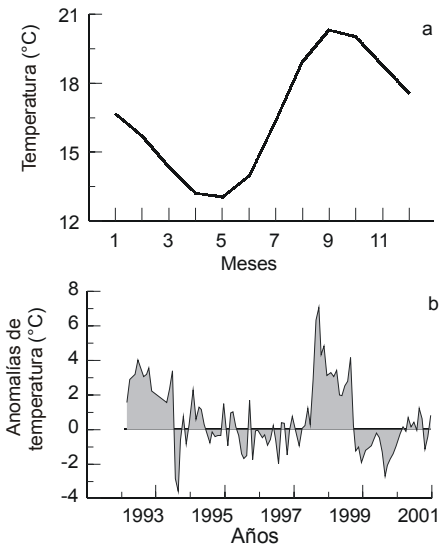


Figura 6. (a) Ciclo mensual de la temperatura del mar, ajustado al año 2000. (b) Desviaciones de la serie del ciclo de la temperatura del mar como valor mensual, estimadas con referencia al año 2000.
Figure 6. (a) Monthly cycle of sea temperature, fitted to the year 2000. (b) Deviations of the series of the sea temperature cycle as monthly value, estimated with reference to 2000.

climáticos detectados por el análisis en esta caracterización ambiental de la zona de estudio. Los componentes estacional e interanual que reporta el análisis espectral resultan de particular importancia.

Discusión

Leighton (1974) mencionó que las postlarvas de *H. corrugata* y *H. fulgens* (abulón amarillo y azul, respectivamente) presentan límites de tolerancia a la temperatura entre los 23.5°C y 26.0°C, aunque las mayores sobrevivencias (cerca al 100%) fueron típicamente con valores intermedios de temperaturas dentro de un rango de 7°C a 31°C, y se observó un rápido aumento en la mortalidad en las vecindades de los valores extremos. Lo anterior sugiere un efecto negativo potencial de los fenómenos ENSO de gran intensidad sobre las postlarvas de abulón, con menor tolerancia a valores altos de temperatura que pudiera estar ocurriendo en Bahía Asunción, si se toman en cuenta a los valores absolutos de temperatura *in situ* observados. Tal es el caso de las temperaturas más altas reportadas en este trabajo para esta área (28–29°C) y que coinciden con las épocas reproductivas de estas especies.

Las tasas de crecimiento son diferenciales para los juveniles de *H. corrugata* y *H. fulgens*; los mayores incrementos se alcanzan a los 24°C para la primera especie mientras que, para la segunda, se dan entre los 27°C y 28°C (Leighton, 1974). Lo anterior indica que el abulón azul durante esa etapa podría verse favorecido con incrementos de temperatura derivados de los eventos ENSO no intensos si, por supuesto, existiera alimento adecuado disponible. Existe información de campo sobre juveniles de abulón que permite plantear esta hipótesis (Rodríguez-Valencia y Caballero-Alegría, 2002).

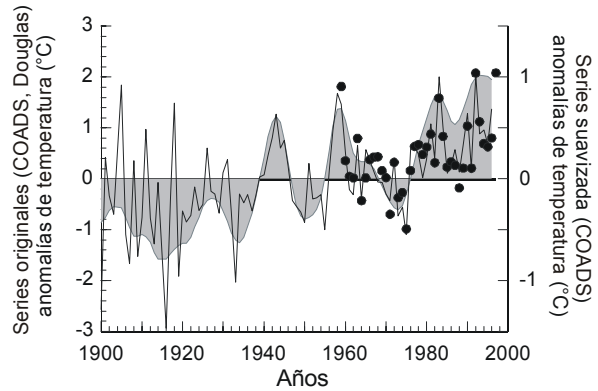


Figura 7. Comparación entre las anomalías anuales de la serie COADS con tendencias suavizadas (líneas continuas y sombreado) y datos promedios anuales de la serie Douglas (puntos).
Figure 7. Comparison between the annual anomalies of the COADS series with smoothed tendencies (continuous line and shaded), and mean annual data from the Douglas series (dots).

Figure 8 shows the values of the periodogram and the relative contribution of the signals of the climatic components detected by the analysis in this environmental characterization of the study area. Particularly important are the seasonal and interannual components of the spectral analysis.

Discussion

Leighton (1974) reported that the postlarvae of *H. corrugata* and *H. fulgens* pink and green abalone, respectively) have tolerance limits to temperatures between 23.5°C and 26.0°C, though greatest survival (nearly 100%) typically occurs with intermediate temperature values, ranging from 7°C

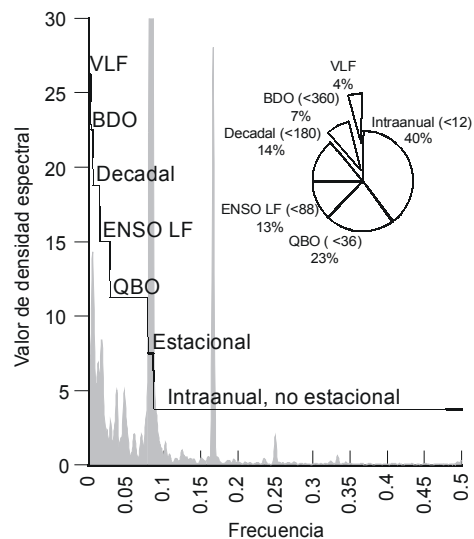


Figura 8. Periodograma (valor de la densidad espectral) de la serie de temperatura superficial del mar de la serie Douglas.
Figure 8. Periodogram (value of the spectral density) of the sea surface temperature of the Douglas series.

La presencia de las temperaturas más bajas en primavera coincide con los fenómenos de surgencias reportados para la zona (Walsh *et al.*, 1974, 1977). En invierno y primavera se observa un ciclo circadiano con dos máximos durante el día (fig. 4a, b), mientras que en verano y otoño el ciclo está marcado por la presencia de un solo máximo hacia mediodía y mínimos en las primeras horas del día (fig. 4c, d). En otoño es cuando se tiene reportado el mayor pico del desove de abulón (Guzmán-del Prío, 1992; Belmar y Guzmán-del Prío, 1992) y, en este caso, es cuando se observan las temperaturas más altas (19.5°C), por lo que asumimos que a estas temperaturas se disparan mecanismos reproductivos de las especies de abulón de Bahía Asunción.

El promedio del ciclo circadiano anualizado se comporta de manera muy parecida a lo que ocurre en verano y otoño, por lo que es de suponer que estos patrones dominan el promedio anual. Por otra parte, es importante mencionar que, si bien la variación en magnitud de la temperatura entre mínimos y máximos se encuentra prácticamente en todas las estaciones del año dentro de los límites de 1°C, en valores absolutos se registraron desde los 12.5°C como mínimo en primavera hasta aproximadamente 19°C como máximo en otoño, lo que hace una diferencia de hasta 6.5°C en el ciclo circadiano, por estación, durante el año (fig. 4 a–d).

El ciclo mensual ajustado muestra claramente la estacionalidad de la temperatura del mar. Abril y mayo son los meses con temperaturas más bajas, en contraste con agosto, septiembre y octubre que son los de temperaturas con mayor magnitud. Las desviaciones de la serie de temperaturas diarias, con respecto a 2000, muestran claramente desviaciones positivas durante los años de 1992–1993 y 1997–1998, tal y como era de esperarse dada la presencia del fenómeno de El Niño en esos años a los que les sigue un periodo de temperaturas más bajas en general.

Respecto al comportamiento interanual de la temperatura del mar, referido a 2000 (fig. 5) se aprecia que particularmente las diferencias en la amplitud del ciclo diario son menores en los años 1997–1998, o año Niño, que en otro periodo. Esto significaría que las altas temperaturas que se presentaron en estos años se mantuvieron relativamente constantes, a diferencia de lo observado en los otros años; adicionalmente, la variación es más amplia hacia la época invernal.

Es de resaltar que las condiciones de largo plazo en general están identificadas con una tendencia de temperaturas relativamente bajas hasta finales de los años treinta. Posteriormente, se presenta una etapa de marcada variabilidad desde principios de los años cuarenta hasta mediados de los setenta y, a partir de la segunda mitad de dicha década, se presenta un cambio hacia temperaturas más altas como lo muestran las anomalías de la temperatura superficial del mar (fig. 7). Esta condición de aumento de temperatura de manera constante y sostenida, sugiere que las condiciones de la comunidad donde se desarrolla el abulón, pudiesen verse alteradas paulatinamente y potencialmente afectar en alguna medida la biología poblacional de cada una de las especies de este gasterópodo

to 31°C; the author also observed an increase in mortality around the extreme values. This suggests a potential negative effect of the intense ENSO events on the abalone postlarvae, with less tolerance to high temperatures in Bahía Asunción, if the absolute *in situ* temperature values are considered, as is the case of the highest temperatures reported herein for this area (28–29°C), which coincide with the reproductive seasons of these species.

The growth rates are different for the juveniles of *H. corrugata* and *H. fulgens* and the largest increases occur at 24°C for the former and at 27–28°C for the latter (Leighton, 1974). This indicates that increases in temperature as a result of non-intense ENSO events may favour the juvenile stages of the green abalone, if of course the appropriate food is available. Field data exist for abalone juveniles that support this hypothesis (Rodríguez-Valencia and Caballero-Alegria, 2002).

The occurrence of the lowest temperatures in spring coincides with the upwelling phenomena reported for the region (Walsh *et al.*, 1974, 1977). The circadian cycle in winter and spring presents two daily maxima (fig. 4a, b), whereas in summer and autumn the cycle presents one maximum towards noon and minima in the first few hours of the day (fig. 4c, d). Abalone spawning has been reported to peak in autumn (Guzmán-del Prío, 1992; Belmar and Guzmán-del Prío, 1992), which is when the highest temperatures were recorded (19.5°C); we therefore assume that at these temperatures, reproductive mechanisms are triggered in the abalone species of Bahía Asunción.

The behaviour of the average of the annualized daily cycle is similar to that of summer and autumn, leading to the assumption that these patterns dominate the annual average. It is also important to mention that even though the variation between maximum and minimum temperature occurs within the limits of 1°C in all the seasons, in absolute values, a minimum of 12.5°C was recorded in spring and a maximum of ~19°C in autumn, which makes a difference of 6.5°C in the daily cycle per season during the year (fig. 4a–d).

The fitted monthly cycle clearly shows the seasonality of the sea temperature. The months with the lowest temperatures were April and May, whereas August, September and October had the highest temperatures. The deviations in the daily temperature series, with respect to the year 2000, as expected clearly indicate positive deviations during the 1992–1993 and 1997–1998 ENSO years, which were followed by a period of lower temperatures.

Regarding the interannual behaviour of sea temperature, with reference to 2000 (fig. 5), the differences in the amplitude of the daily cycle are lower during the 1997–1998 El Niño than in any other period. This means that the high temperatures that occurred during these years remained relatively constant as opposed to that observed in other years; also, there is greater variation towards winter.

It should be noted that the long-term conditions are identified with a trend of relatively low temperatures until the late 1930s, followed by a period of marked variability from the

que se distribuyen en la zona de estudio, o bien de alguna otra especie relevante de la comunidad (Guzmán-del Prío, 1994; Lluch-Belda *et al.*, 1997; Shepherd *et al.*, 1998).

En la perspectiva del siglo, es evidente que los años recientes (después de mediados de los setenta) presentan una condición mucho más cálida que la que persistió durante las décadas anteriores. De hecho, la región era alrededor de 1.3°C más fría durante las primeras décadas del siglo (1900–1935) que en los tiempos recientes (1978–1996). El periodo de inicio y desarrollo de la pesquería (1950–1975) fue, en promedio, 0.7°C más frío que el actual.

Considerando la caracterización ambiental con perspectiva de siglo, es posible que un aumento sostenido de la temperatura en los últimos años pudiera haber afectado mayormente a la flora y la fauna bentónicas característica de la comunidad rocosa de los bancos pesqueros de abulón de la zona: *Macrocystis pyrifera*, *Eisenia arborea*, *Astraea undosa* Wood 1828, *Haliotis fulgens*, *H. corrugata*, *Bossiella orbigniana* (Dec.) Silva 1957, *Corallina officinalis* Linnaeus 1758, *C. pinnatifolia* (Manza) Dawson 1953, *Megathura crenulata* Sowerby 1825 y *Phyllospadix torreyii* Hodgson 1980; ya que en este grupo, salvo por las especies de *Corallina* que tienen origen subtropical, el componente principal es de origen templado (Guzmán-del Prío *et al.*, 1991). Esta hipótesis es coherente con los resultados del trabajo de Barry *et al.* (1995), quienes reportan un cambio de largo plazo en la composición de especies de invertebrados en una comunidad rocosa intermareal en la parte central de California, EUA, en la que las abundancias de ocho de nueve especies con distribución sureña se incrementaron significativamente, mientras que las abundancias de cinco de ocho especies de afinidad norteña decrecieron de forma significativa entre 1931–1933 y 1993–1994, mismo periodo en el que se registró, en promedio, un aumento de la temperatura del mar.

Adicionalmente, uno de los componentes más relevantes de la comunidad, como lo es *M. pyrifera*, ha sido estudiado con una perspectiva de largo plazo en la parte sur de California y se concluyó que la biomasa de esta macroalga disminuyó en aproximadamente dos tercios desde 1957. Esta disminución se ha relacionado estrechamente con un aumento de la temperatura del mar y con la limitación concomitante de nutrientes claves para el desarrollo de esta especie (Tegner *et al.*, 1996).

Actualmente *H. fulgens* es la especie que más contribuye a la pesquería en Bahía Asunción, con alrededor del 90%, mientras que *H. corrugata* aporta aproximadamente un 9% (León-Carballo y Muciño-Díaz, 1996). Sin embargo, *H. corrugata* fue el principal componente de la pesquería durante los inicios de ésta y fue reduciendo su aportación de manera continua y de forma más evidente a mediados de los años setenta (Ponce-Díaz *et al.*, 2000). Por otro lado, en California recientemente se ha prohibido la captura del abulón ya que se observaron tendencias de disminución en sus poblaciones desde principios de los cincuenta para *H. corrugata*, y a mediados de los setenta para *H. fulgens*, hasta llegar al punto de cerrar la pesquería (Karpov *et al.*, 2000). Esta situación indica que estas especies

early 1940s to the mid-1970s. In the second half of the latter decade, there is a change to higher temperatures, as shown by the sea surface temperature anomalies (fig. 7). This constant and sustained increasing temperature trend suggests that the conditions of the community where the abalone develops could be gradually altered and in some way affect the populational biology of the species of this gastropod that occur in this area or of any other relevant species in the community (Guzmán-del Prío, 1994; Lluch-Belda *et al.*, 1997; Shepherd *et al.*, 1998).

The perspective for the 20th century shows that warmer conditions prevailed after the mid-1970s. In fact, the region was 1.3°C colder during the first years of the century (1900–1935) than in recent times (1978–1996). The period when the fishery began and was developed (1950–1975) was, on average, 0.7°C cooler than at present.

Considering the environmental characterization for the century, it is possible that a sustained increase in temperature in the last few years could significantly affect the characteristic benthic flora and fauna of the rocky community of abalone banks in the area: *Macrocystis pyrifera*, *Eisenia arborea*, *Astraea undosa* Wood 1828, *Haliotis fulgens*, *H. corrugata*, *Bossiella orbigniana* (Dec.) Silva 1957, *Corallina officinalis* Linnaeus 1758, *C. pinnatifolia* (Manza) Dawson 1953, *Megathura crenulata* Sowerby 1825, and *Phyllospadix torreyii* Hodgson 1980. Except for the species of *Corallina*, which are of subtropical origin, the other species of this group are of temperate origin (Guzmán-del Prío *et al.*, 1991). This hypothesis concurs with the results of Barry *et al.* (1995), who reported a long-term change in the composition of invertebrate species in an intertidal rocky community of central California (USA), where the abundance of eight of nine species of southern distribution increased significantly, while the abundance of five of eight species of northern affinity decreased significantly between 1931–1933 and 1993–1994, period in which an average increase in sea temperature was recorded.

In addition, a long-term study conducted in southern California on *M. pyrifera*, which is one of the most important components of the community, revealed that the biomass of this macroalga decreased by approximately two thirds since 1957. This decrease has been related to an increase in sea temperature and to the concomitant limitation of key nutrients for the development of this species (Tegner *et al.*, 1996).

At present, *H. fulgens* is the species that contributes most to the fishery at Bahía Asunción, around 90%, while *H. corrugata* accounts for 9% (León-Carballo and Muciño-Díaz, 1996). However, *H. corrugata* was the principal component of the fishery when it began, but its contribution began to decrease steadily at first and more notably by the mid-1970s (Ponce-Díaz *et al.*, 2000). On the other hand, in California, the capture of abalone has recently been banned as a result of the steady decline in its populations since the early 1950s, in the case of *H. corrugata*, and the mid-1970s, in the case of *H. fulgens*, leading to the collapse of the fishery (Karpov *et al.*, 2000). This indicates that these species have a differential tolerance to the climatic conditions of the region; hence, *H.*

presentan una tolerancia diferencial a las condiciones del clima en la región; así, *H. fulgens* tiene una mayor adaptación a esta zona de transición que otras especies de abulones según lo demuestra su elevada participación en la proporción de las capturas en años recientes que se distinguen por ser más cálidos de lo normal, así como por su distribución más sureña pues la especie ocurre hasta los límites de Bahía Magdalena (Cox, 1962). No obstante, esta posibilidad de un efecto de largo plazo (por temperatura) en la reducción de las poblaciones de *H. corrugata* no elimina la potencial causa de su disminución del abulón amarillo por la pesca o una interacción de estos dos factores.

Por otra parte, el análisis de densidad espectral indica que la mayor contribución a la variabilidad de la serie es el componente estacional; conviene subrayar que el componente interanual es el segundo factor que explica la mayor variabilidad de los datos, lo cual se identifica seguramente con la ocurrencia de fenómenos tipo ENSO en la zona y el consecuente efecto de estos fenómenos sobre la comunidad en general. Ante la presencia de eventos tipo ENSO se ha sugerido la ocurrencia de cambios en el sentido de una reducción de ciertas poblaciones de pelágicos menores, reducción de alimento, cambios temporales en la estructura trófica de los sistemas, invasión de especies tropicales hacia zonas templadas e incluso cambios en la biodiversidad; sin embargo, todos estos cambios, deletéreos para ciertas especies, tienen un carácter episódico como el propio fenómeno de El Niño y su efecto en la comunidad biótica depende de su intensidad y duración (Guzmán-del Próo *et al.*, en prensa).

En relación a los efectos de El Niño 1997–1998, para la costa occidental central de la Península de Baja California se ha reportado un efecto directo sobre la comunidad de los mantos de *M. pyrifera*, los cuales desaparecieron totalmente hacia finales del otoño (noviembre de 1997) y, en el caso de *E. arborea*, la especie quedó reducida a unos cuantos especímenes defoliados en la zona contigua a Bahía Tortugas (Guzmán-del Próo *et al.*, en prensa). Sin embargo, para zonas más al sur, el efecto sobre *E. arborea* no fue tan drástico (Hernández-Carmona *et al.*, 2001). Este efecto deletéreo sobre estas macroalgas es relevante por su condición de ser fuente de dietas naturales para el abulón (Guzmán-del Próo *et al.*, 1991; Serviere-Zaragoza *et al.*, 1998). Otro efecto directo observado sobre los componentes de la comunidad, producto de la variación interanual de la temperatura del mar, es la disminución en el reclutamiento de juveniles de abulón para la zona de Bahía Tortugas durante el fenómeno ENSO más intenso (Carreón-Palau, 2000; Guzmán-del Próo *et al.*, en prensa). Todo lo anterior revela la importancia de la variación interanual detectada en el análisis espectral.

En el área de estudio es notoria la ausencia de información sobre aspectos del clima marino, particularmente acerca de mediciones finas o de alta frecuencia; la información disponible está asociada a datos de gran escala y de baja frecuencia, como son las series de temperatura superficial del mar de COADS o la serie Douglas. Por tanto, consideramos que este

fulgens presents greater adaptation to this transition zone than other abalone species, as shown by its high percentage in the composition of the catches in recent years, which have been warmer than normal, as well as by its more southern distribution that extends to the limits of Bahía Magdalena (Cox, 1962). Nevertheless, this possibility of a long-term effect of temperature on the decrease of the populations of *H. Corrugata* does not eliminate fishing, or an interaction of these two factors, as the potential cause for the decline of this species.

The spectral density analysis indicates that the seasonal component is the major contributor to the variability of the series. The interannual component is the second factor that explains the variability of the data, and is probably related to the occurrence of ENSO events in the region and to the effect of these phenomena on the community in general. It has been suggested that ENSO events are responsible for the depletion of certain populations of minor pelagics, a decrease in food, temporal changes in the trophic structure of the systems, invasion of temperate zones by tropical species and even changes in the biodiversity; however, all these changes, deleterious for certain species, are episodic, just like the El Niño phenomenon, and their effect on the biotic community depends on their intensity and duration (Guzmán-del Próo *et al.*, in press).

On the west coast of the central part of the Baja California Peninsula, the 1997–1998 El Niño had a direct effect on the *M. pyrifera* beds, which disappeared completely by the end of autumn (November 1997), and *E. arborea* was reduced to a few defoliated specimens in the area contiguous to Bahía Tortugas (Guzmán-del Próo *et al.*, in press). However, in areas further south, the effect on *E. arborea* was not so drastic (Hernández-Carmona *et al.*, 2001). This harmful effect on these macroalgae is relevant because they are an important part of the abalone's natural diet (Guzmán-del Próo *et al.*, 1991; Serviere-Zaragoza *et al.*, 1998). Another direct effect of the interannual variation of sea temperature on the components of the community is the decrease in the recruitment of abalone juveniles in the area of Bahía Tortugas during the most intense ENSO event (Carreón-Palau, 2000; Guzmán-del Próo *et al.*, in press). All the above indicate the importance of the interannual variation detected in the spectral analysis.

There is a notable lack of information for the study area regarding aspects of the marine climate, particularly fine or high-frequency measurements. The information available is associated with large-scale and low-frequency data, such as the COADS and Douglas series. We therefore consider that this study contributes to the knowledge of the climatic variability of the region and that the information will be useful for future analyses related to organisms that make up the communities found in these highly productive coastal systems.

Acknowledgements

The authors thank the Federación Regional de Cooperativas de Producción Pesquera *Baja California*, the *Leyes de Reforma* and *California de San Ignacio* fishing

trabajo es una aportación al conocimiento de la variabilidad climática de la zona y que brindará más elementos cuantitativos para futuros análisis relacionados con los organismos que conforman las comunidades presentes en estos sistemas costeros altamente productivos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Federación Regional de Cooperativas de Producción Pesquera *Baja California*, a las cooperativas de producción pesquera *Leyes de Reforma y California de San Ignacio*, al Programa Langosta del Centro Regional de Investigaciones Pesqueras de La Paz (INP), a Fernando López-Salas y a Gustavo Hernández-Carmona (CICIMAR-IPN) por su apoyo en las tareas de campo y/o por proporcionar parte de la información utilizada, al Laboratorio de Modelación y Pronóstico Pesquero del CIBNOR por la sistematización de los datos, y al Dr. Sergio A. Guzmán-del Prío (ENCB-IPN) por leer y comentar críticamente el manuscrito inicial. Este trabajo fue financiado parcialmente por el CIBNOR (Programa Ecología Pesquera RP-6) y el CONACYT (proyecto 35151B). GPD y JJBR son becarios CONACYT (registros 119827 y 163276, respectivamente). Finalmente se agradece a los cuatro revisores anónimos, quienes aportaron valiosas sugerencias e ideas que contribuyeron a mejorar este trabajo.

Referencias

Amador-Buenrostro, A., Argote-Espinoza, M.L., Mancilla-Peraza, M. y Figueroa-Rodríguez, M. (1995). Variaciones de período corto de la circulación anticiclónica en Bahía Sebastián Vizcaíno, B.C. *Cien. Mar.*, 21(2): 201–223.

Barry, J.P., Baxter, C.H., Sagarin, R.D. and Gilman, S.E. (1995). Climate-related, long-term changes in a California rocky intertidal community. *Science*, 267: 672–675.

Belmar-Pérez, J. y Guzmán-del Prío, S.A. (1992). Madurez sexual y ciclo gonádico en *Haliotis fulgens* y *Astraea undosa* en Bahía Tortugas. En: S.A. Guzmán-del Prío (ed.), Taller México-Australia sobre reclutamiento de recursos bentónicos de Baja California. SEPESCA / IPN, pp. 121–129.

Breen, P.A. (1992). A review of models used for stock assessment in abalone fisheries. In: S.A. Shepherd, J.M. Tegner and S.A. Guzmán-del Prío (eds.), *Abalone of the World: Biology, Fisheries and Culture*. Fishing News Books, Cambridge, UK, 607 pp.

Carreón-Palau, L. (2000). Microhabitat, distribución y abundancia de juveniles de abulón, *Haliotis fulgens* y *H. corrugata* en Bahía Tortugas, B.C.S., México. Tesis de maestría, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional, 79 pp.

Cox, K.W. (1962). Californian abalones, family Haliotidae. *Calif. Fish Game*, 118: 1–133.

Douglas, A.V. (1976). Past air-sea interactions over the eastern North Pacific Ocean as revealed by tree-ring data. Department of Geosciences, Tucson, University of Arizona, 196 pp.

Douglas, A.V. (1980). Geophysical estimates of sea-surface temperatures off North America. *CalCOFI Rep.*, 21: 102–112.

Guzmán-del Prío, S.A., Mille-Pagaza, S.R., Guadarrama-Granados, R., De la Campa-de Guzmán, S., Carrillo-Laguna, J., Pereira-

cooperatives, and the Programa Langosta of the Centro Regional de Investigaciones Pesqueras at La Paz (INP). Special thanks to Fernando López-Salas and Gustavo Hernández-Carmona (CICIMAR-IPN) for their help with the field work and providing part of the information used, to the Laboratorio de Modelación y Pronóstico Pesquero of CIBNOR for the systematization of the data, and to Dr. Sergio A. Guzmán-del Prío (ENCB-IPN) for his critical comments to the original manuscript. This study was partially funded by CIBNOR (Programa Ecología Pesquera RP-6) and CONACYT (project 35151B). GPD and JJBR received scholarships from CONACYT (grants 119827 and 163276, respectively). Finally, we thank four anonymous reviewers for their comments and suggestions that helped to improve this work.

English translation by Christine Harris.

Corona, A., Belmar-Pérez, J., Parra-Alcocer, M. de J. y Luque-Guerrero, A.C. (1991). La comunidad bentónica de los bancos de abulón (*Haliotis* spp. Mollusca: gasteropoda) en Bahía Tortugas, Baja California Sur, México. *Anales de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas*, (36): 27–59.

Guzmán-del Prío, S.A. (1992). A review of the biology of abalone and its fishery in Mexico. In: S.A. Shepherd, J.M. Tegner and S.A. Guzmán-del Prío (eds.), *Abalone of the World: Biology, Fisheries and Culture*. Fishing News Books, Cambridge, UK, 607 pp.

Guzmán-del Prío, S.A. (1994). Biología, ecología y dinámica de población de abulón (*Haliotis* spp.) de Baja California, México. Tesis doctoral, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional, 188 p.

Guzmán-del Prío, S.A., Carreón-Palau, L., Belmar-Pérez, J., Carrillo-Laguna, J. y Herrera-Fregoso, R. Efectos del fenómeno de “El Niño” sobre el reclutamiento de invertebrados bentónicos de Baja California. *Geofis. Int.* (en prensa).

Hernández-Carmona, G., García, O., Robledo, D. and Foster, M. (2000). Restoration techniques for *Macrocystis pyrifera* (Phaeophyceae) populations at the southern limit of their distribution in Mexico. *Bot. Mar.*, (43): 273–284.

Hernández-Carmona, G., Robledo, D. and Serviere-Zaragoza, E. (2001). Effect of nutrient availability on *Macrocystis pyrifera* recruitment and survival near its southern limit off Baja California. *Bot. Mar.*, (44): 221–229.

Hewitt, R. (1981). Eddies and speciation in the California Current. *CalCOFI Rep.*, 22: 96–98 p.

INP (2000). Pesquería de abulón. En: *Sustentabilidad y Pesca Responsable en México. Evaluación y Manejo 1999–2000*. Instituto Nacional de la Pesca. CD-Rom.

Karpov, K.A., Haaker, P.L., Taniguchi, I.K. and Rogers-Bennett, L. (2000). Serial depletion and the collapse of the California abalone (*Haliotis* spp.) fishery. Workshop on rebuilding abalone stocks in British Columbia. *Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.*, 130: 11–24.

Leighton, D.L. (1974). The influence of water temperature on larval and juvenile growth in three species of southern Californian abalones. *Fish. Bull.*, (72): 1137–1145.

León-Carballo, G. y Muciño-Díaz, M. (1996). Pesquería de abulón. En: M. Casas-Valdéz y G. Ponce-Díaz (eds.), *Estudio del Potencial Pesquero y Acuicola de Baja California Sur*. SEMARNAP, Gob. BCS, FAO, INP, UABCS, CIBNOR, CICIMAR, CETmar, pp. 15–41.

- Lluch-Belda, D., Lluch-Cota, D.B., Lluch-Cota, S.E. y Hernández-Vázquez, S. (1997). Análisis de la pesquería de abulón de la península de Baja California. Informe Técnico, CIBNOR, 19 pp.
- Lluch-Belda, D., Hernández-Rivas, M., Saldierna-Martínez, R. y Guerrero-Caballero, R. (2000). Variabilidad de la temperatura superficial del mar en Bahía Magdalena, B.C.S. *Océanides*, 15(1): 1–23.
- Lluch-Belda, D., Laurs, R.M., Lluch-Cota, D.B. and Lluch-Cota, S.E. (2001). Long-term trends of interannual variability in the California Current System. *CalCOFI Rep.*, 42: 129–144.
- Muñoz, L.T. (1976). Los bancos abuloneros de la parte central de Baja California. Memorias del Primer Symposium sobre recursos pesqueros Masivos de México. Vol. Esp. sobre Abulón/Langosta. INP 1: 161–184.
- Ponce-Díaz, G., Vega-Velázquez, A., Ramade-Villanueva, M., León-Carballo, G. and Franco-Santiago, R. (1998). Socioeconomic characteristics of the abalone fishery along the west coast of Baja California Peninsula, Mexico. *J. Shellfish Res.*, 17(3): 853–857.
- Ponce-Díaz, G., Chávez, E.A. y Ramade-Villanueva, M. (2000). Evaluación de la pesquería de abulón azul *Haliotis fulgens* en Bahía Asunción, Baja California Sur, México. *Ciencias Marinas*, 26(3): 393–412.
- Ponce-Díaz, G., López-Salas, F., Hernández-Carmona, G., Lluch-Cota, S., Bautista-Romero, J. y Lluch-Belda, D. (2003). Base de datos de la temperatura del mar en Bahía Asunción, Baja California Sur, México. Instituto de Investigaciones Oceanológicas/Universidad Autónoma de Baja California, México, Reporte Técnico 2003-01, 16 pp. (Disponible on-line, formato pdf, en: <http://rcmarinas.ens.uabc.mx/~cmarinas/reportes/reportetecnico012003.pdf>).
- Prince, J.D. and Guzman del Prío, S.A. (1993). A stock reduction analysis of Mexican abalone (*Haliotid*) fishery. *Fish. Res.*, (16): 25–49.
- Rodríguez-Valencia, J.A. and Caballero-Alegría, F. (2002). Temporal fluctuations (1989–1999) in the populations of *Haliotis fulgens* and *H. corrugata* (Gastropoda: Haliotidae), at Isla San Benito (Baja California, Mexico). *J. Shellfish Res.*, 21(1): 163–171.
- Serviere-Zaragoza, E., Gómez-López, D. and Ponce-Díaz, G. (1998). The natural diet of the green abalone (*Haliotis fulgens* Philippi) in the southern part of its range, Baja California Sur, Mexico, assessed by an analysis of gut contents. *J. Shellfish Res.*, 17(3): 777–782.
- Shepherd, S.A., Turrubiates, J.R. and Hall, K. (1998). Decline of the abalone fishery at La Natividad, Mexico: Overfishing or climate change? *J. Shellfish Res.*, 17(3): 839–846.
- Tegner, M.J., Dayton, P., Edwards, P.B. and Riser, K.L. (1996). Is there evidence for long-term climatic change in southern California kelp forest? *CalCOFI Rep.*, 37: 111–126.
- Vega, A., Lluch-Belda, D., Muciño, M., León, G., Hernández, S., Lluch-Cota, D., Ramade, M. and Espinoza, G. (1995). Development, perspectives and management of lobster and abalone fisheries off northwest Mexico, under a limit access system. Proc. 2nd World Fisheries Congress. Collingwood, VIC, Australia, 797 pp.
- Vega-Velázquez, A., Espinosa-Castro, G. y Gómez-Rojo, C. (1996). Pesquería de langosta *Panulirus* spp. En: M. Casas-Valdez y G. Ponce-Díaz (eds.), Estudio del Potencial Pesquero y Acuícola de Baja California Sur. SEMARNAP, Gob. BCS, FAO, INP, UABCS, CIBNOR, CICIMAR, CETmar, pp. 227–261.
- Walsh, J.J., Kelly, J.C., Whitehead, T.E., MacIssac, J.J. and Huntsman, S.A. (1974). Spin-up of the Baja California upwelling ecosystem. *Limnol. Oceanogr.*, 19(4): 553–573.
- Walsh, J.J., Whitehead, T.E., Kelly, J.C., Huntsman, S.A. and Pillsbury, R.D. (1977). Further transition states of the Baja California upwelling ecosystem. *Limnol. Oceanogr.*, 22(2): 264–280.
- Woodruff, S.D., Lubker, S.J., Wolter, K., Worley, S.J. and Elms, J.D. (1993). Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (COADS) Release 1a: 1980-92. Earth System Monitor, 4(1): 1–8. (<http://www.cdc.noaa.gov/coads/coads1a.html>).