

Hidrografía en la Boca Norte de la Bahía de La Paz, Baja California Sur, México

Hydrography at the North Mouth of La Paz Bay, Baja California Sur, Mexico

M Obeso-Nieblas^{1*}, B Shirasago-Germán^{1*}, JH Gaviño-Rodríguez²,
H Obeso-Huerta³, EL Pérez-Lezama¹, AR Jiménez-Illescas¹

¹ Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Ave. Instituto Politécnico Nacional s/n CP 23000, La Paz, Baja California Sur, México. * E-mail: mniebla@ipn.mx

² Centro Universitario de Investigaciones Oceanológicas, Universidad de Colima, México.

³ Instituto Tecnológico de La Paz

Resumen

Con el objetivo de describir la variabilidad hidrográfica en la principal comunicación de la Bahía de La Paz con el Golfo de California, llamada Boca Norte, se analizaron datos de CTD de cuatro campañas de muestreo realizadas durante un ciclo anual (mayo, julio y octubre de 2001, así como febrero de 2002). Los resultados muestran en la primavera y el verano una ausencia de una capa de mezcla, con una intensa estratificación de temperatura y salinidad, mientras que en el otoño se registró una capa de mezcla de 30 m con una temperatura de 28.5°C, y en el invierno se detecta una inusual capa de mezcla de más de 100 m, con una temperatura de 17.9°C. Es de destacar que las capas superficial y subsuperficial de la bahía y el golfo, presentan una estructura similar, siendo la diferencia más significativa la presencia en el golfo de Agua Intermedia del Pacífico (AIP), la cual no penetra a la bahía debido a la barrera que representa el Umbral de la Boca Norte. En los diagramas T-S se observa en mayo la presencia de Agua del Golfo de California (AGC), Agua Subsuperficial Subtropical (ASS) y AIP, mientras que en julio se indentificaron cuatro masas de agua, AGC, Agua Superficial Ecuatorial (ASE), ASS y AIP. En octubre se detectó una gran cantidad de ASE y una fuerte disminución del AGC; sin embargo, en febrero se encontró únicamente AGC y ASS. Este estudio muestra una importante variabilidad estacional hidrográfica en la zona de la Boca Norte, con marcadas diferencias entre la bahía y el golfo, lo que proporciona una contribución a la oceanografía regional.

Palabras clave: hidrografía, masas de agua, termoclina, estratificación, diagramas T-S.

Abstract

To describe the hydrographical variability at the North Mouth of La Paz Bay, its main point of communication with the Gulf of California, CTD data were analyzed from four sampling surveys conducted during an annual cycle (May, July and October 2001, and February 2002). The results showed an absence of the mixed layer and intense temperature and salinity stratification in spring and summer. In autumn a 30-m mixed layer was registered, with a temperature of 28.5°C, while in winter an unusual 100-m mixed layer was detected, with a temperature of 17.9°C. Particular noteworthy is the similarity of the structure between the surface and subsurface layers of the bay and gulf. The most significant difference was the presence of Pacific Intermediate Water (PIW) in the gulf, which does not intrude into the bay due to the barrier created by the sill at the mouth. The T-S diagrams revealed the presence of Gulf of California Water (GCW), Subtropical Subsurface Water (SSW) and PIW in May. In July, however, four water masses were identified: GCW, Equatorial Surface Water (ESW), SSW and PIW. In October, a significant amount of ESW and a considerable decrease in GCW were detected, but in February only GCW and SSW were found. This study shows important hydrographic seasonal variability in the area of the North Mouth, with marked differences between the bay and the gulf, contributing to the understanding of the regional oceanography.

Key words: hydrography, water masses, thermocline, stratification, T-S diagrams.

Introducción

Las condiciones hidrográficas de la Bahía de La Paz (BCS, México), en particular en su parte profunda, se encuentran muy influenciadas por la variabilidad del sur del Golfo de California (Obeso-Nieblas 2003). A su vez, el Golfo de California se acopla a la variabilidad ambiental interanual de gran escala del Pacífico Oriental, lo cual ha podido ser identificado en series de tiempo del nivel del mar y anomalías de temperatura en la costa (Durazo *et al.* 2005, Jiménez-Illescas 1996).

Introduction

The hydrographic conditions in La Paz Bay (Baja California Sur, Mexico), particularly in the deep part, are strongly influenced by the variability in the southern Gulf of California (Obeso-Nieblas 2003). The Gulf of California, in turn, is influenced by the large-scale interannual environmental variability of the East Pacific, as shown by time series of sea level and coastal temperature anomalies (Durazo *et al.* 2005, Jiménez-Illescas 1996).

La marcada variabilidad espacial y estacional de las condiciones oceanográficas en la Bahía de La Paz son ocasionadas, por una parte, por las variaciones locales de los vientos y la radiación solar propios de una región semiárida, con altas tasas de evaporación, y por otra, por la influencia del Golfo de California que tiene su propia dinámica, lo cual es corroborado por las condiciones oceanográficas prevalecientes en la parte profunda de la bahía, en la Boca Norte, y en la región adyacente del golfo (Obeso-Nieblas *et al.* 2004).

La Bahía de La Paz se encuentra sujeta principalmente a dos patrones de vientos. Los vientos del sur y sureste, que ocurren al final de la primavera y persisten en verano y hasta inicio del otoño, localmente llamados Coromuel, con magnitudes de $\sim 4 \text{ m s}^{-1}$, y que generalmente ocurren combinados con calmas frecuentes. Los vientos del norte y noroeste, dominantes a finales del otoño y en el invierno, son fuertes y persistentes, y alcanzan magnitudes de 12 m s^{-1} . Estos patrones de viento corresponden al carácter monzónico que rige sobre el Golfo de California (Jiménez *et al.* 2005) y, aunados a las variaciones estacionales de radiación solar y la influencia de procesos que ocurren en el golfo, son los que generan las condiciones hidrográficas propias de la bahía (Obeso-Nieblas 2003).

Un ejemplo de esto es la ausencia de la capa de mezcla y el afloramiento de la termoclina, haloclina y pycnoclina hacia la superficie durante primavera y verano, así como la presencia de una marcada estratificación como resultado de vientos relativamente débiles del sureste y sur-sureste, y una fuerte radiación solar (Salinas-González *et al.* 2003, Obeso-Nieblas *et al.* 2004). Por otra parte, la generación de una capa de mezcla y el hundimiento de termoclina, haloclina y pycnoclina durante otoño e invierno, son resultado de los fuertes vientos del noroeste y norte antes mencionados (Salinas 2000, Obeso-Nieblas 2003). Estas condiciones coinciden con las encontradas por Jiménez *et al.* (1994) y Jiménez-Illescas (1996) en marzo de 1994, quienes reportaron una capa de mezcla de 40 m de profundidad causada por el efecto de los vientos del noroeste.

La estructura termohalina de la parte profunda de la Bahía de La Paz se forma debido a procesos atmosféricos y al intercambio de agua con regiones adyacentes del mar abierto. Salinas-González *et al.* (2003) encontraron que durante el verano, bajo la influencia atmosférica local, se desarrolla una intensa estratificación desde la superficie, con gradientes verticales de temperatura hasta de 0.3°C m^{-1} .

En relación a los efectos de El Niño 1997–1998 (bimodal) en la Bahía de La Paz, Obeso-Nieblas *et al.* (2004) señalan que, para julio de 1997, el mayor impacto había sido en los primeros 100 m de la capa superficial, consistiendo en una disminución de la salinidad y la desaparición de la haloclina; y para julio de ese mismo año el principal impacto de este fenómeno fue el incremento de temperatura (de 1.5°C a 4.2°C) y el hundimiento de la termoclina e isoterma, acompañado por la presencia de un giro ciclónico, en la parte profunda de la bahía.

Respecto a las masas de agua presentes en la bahía, Monreal-Gómez *et al.* (2001) en junio de 1998 identificaron

The marked spatial and seasonal variability of the oceanographic conditions in La Paz Bay are caused, in part, by variations in the local wind regime and solar radiation characteristic of a semiarid region with high rates of evaporation. They are also caused by the influence of the Gulf of California with its distinct dynamics; this is corroborated by the predominant oceanographic conditions in the deep part of the bay, at the North Mouth, and in the region adjacent to the gulf (Obeso-Nieblas *et al.* 2004).

La Paz Bay is subject to two main wind patterns. Southerly and southeasterly winds, locally called *Coromuel*, prevail from late spring to early autumn, with magnitudes of 4 m s^{-1} combined with frequent calms. Strong and persistent northerly and northwesterly winds prevail in late autumn and winter, reaching values of 12 m s^{-1} . These wind patterns correspond to the monsoonal characteristics of the climate in the Gulf of California (Jiménez *et al.* 2005), and together with the seasonal variations in solar radiation and the influence of processes occurring in the gulf, generate the bay's distinct hydrographic conditions (Obeso-Nieblas 2003).

Spring and summer are characterized by the absence of the mixed layer and rising of the thermocline, halocline and pycnocline, as well as by the presence of marked stratification as a result of the relatively weak southeasterly and south-southeasterly winds and strong solar radiation (Salinas-González *et al.* 2003, Obeso-Nieblas *et al.* 2004). Autumn and winter are characterized by the presence of the mixed layer and deepening of the thermocline, halocline and pycnocline, caused by the strong northerly and northwesterly winds (Salinas 2000, Obeso-Nieblas 2003). These conditions coincide with those found by Jiménez *et al.* (1994) and Jiménez-Illescas (1996) in March 1994, who reported a 40-m-deep mixed layer caused by the effect of northwesterly winds.

The thermohaline structure of the deep part of La Paz Bay is generated by the behaviour of atmospheric processes and the exchange of water with adjacent regions of the open sea. Salinas-González *et al.* (2003) observed that during summer, under local atmospheric conditions, intense stratification develops from the surface, with vertical temperature gradients of up to 0.3°C m^{-1} .

In relation to the effects of the 1997–1998 El Niño event (bimodal), Obeso-Nieblas *et al.* (2004) mention that, by July 1997, the first 100 m of the surface layer had shown a decrease in salinity and the disappearance of the halocline; and by July of the same year an increase in temperature (from 1.5°C to 4.2°C) and the deepening of the thermocline and isotherms had occurred, accompanied by the presence of a cyclonic gyre in the deep part of La Paz Bay.

Monreal-Gómez *et al.* (2001) identified three water masses in La Paz Bay in June 1998: Gulf of California Water (GCW), Equatorial Surface Water (ESW) and Subtropical Subsurface Water (SSW). These authors also indicated that the bathymetric sill along the North Mouth prevents Pacific Intermediate

tres masas de agua: Agua del Golfo de California (AGC), Agua Superficial Ecuatorial (ASE) y Agua Subsuperficial Subtropical (ASS). Asimismo, mencionan que el umbral batimétrico a lo largo de la Boca Norte evita la entrada de Agua Intermedia del Pacífico (AIP) y la salida de las aguas profundas de la bahía hacia el golfo. Obeso-Nieblas (2003) señala la presencia permanente en la bahía de AGC y ASS, detectando ASE durante el otoño y de forma extraordinaria durante el verano de 1997 e invierno de 1998, al parecer producto de los efectos del fenómeno de El Niño en la región.

El objetivo del presente estudio es analizar la variabilidad estacional hidrológica en la zona de la Boca Norte, durante el periodo 2001–2002, y estudiar el comportamiento diferencial entre la Bahía de La Paz y el área adyacente del Golfo de California.

Área de estudio

La Boca Norte de la Bahía de La Paz (24.46°–25.18° N, 110.02°–110.68° W) se ubica frente a la costa este de la Península de Baja California (México) y 200 km al noroeste de la boca del Golfo de California (fig. 1). La región presenta un clima del tipo BW (h') hw (e'), seco y árido (García 1973, Contreras 1988). La temperatura media anual es de 23.8°C, la media mínima en invierno es de 8°C y la máxima en verano es de 37°C (INEGI 1994).

Cruz-Orozco *et al.* (1990) describieron los principales rasgos batimétricos de la bahía. En su parte norte destaca la Cuenca Alfonso, una depresión con una profundidad máxima de 450 m. En su parte central, una falla con rumbo suroeste parte del extremo norte de la Isla La Partida, así como un cadena de montes submarinos constituida por tres promontorios con cimas entre 250 y 300 m de profundidad, entre Isla San José y el complejo insular La Partida-Espíritu Santo. Este

Water (PIW) from entering the bay and the deep bay waters from exiting into the gulf. Obeso-Nieblas (2003) reported the permanent presence of GCW and SSW in the bay, and detected ESW in autumn and extraordinarily in the summer of 1997 and winter of 1998, apparently due to the influence of the El Niño phenomenon.

This study aims to analyze the seasonal hydrographic variability in the area of the North Mouth during the period 2001–2002 and determine the differential behaviour between La Paz Bay and the area adjacent to the Gulf of California.

Study area

The study area comprises the North Mouth of La Paz Bay (24.46°–25.18° N, 110.02°–110.68° W), located on the east coast of the Baja California Peninsula (Mexico), 200 km from the mouth of the Gulf of California (fig. 1). The region has a dry, arid climate, of type BW (h') hw (e') (García 1973, Contreras 1988). Mean annual temperature is 23.8°C, mean minimum winter temperature is 8°C and mean maximum summer temperature is 37°C (INEGI 1994).

Cruz-Orozco *et al.* (1990) described the main bathymetric characteristics of the bay. In the northern part, Alfonso Basin has a maximum depth of 450 m. In the central part, a fault extends southwestwards from the northern tip of La Partida Island. A chain of three underwater seamounts, with summits between 250 and 300 m depth, occurs between San José Island and the Espíritu Santo-La Partida island complex, which in conjunction with the predominant bathymetric characteristics towards the northwest, forms a sill between the bay and gulf. Silverberg *et al.* (2006) studied the vertical flux of particulate matter in Alfonso Basin and reported that in 2002 a variation, in both composition and intensity, occurred in a matter of weeks.

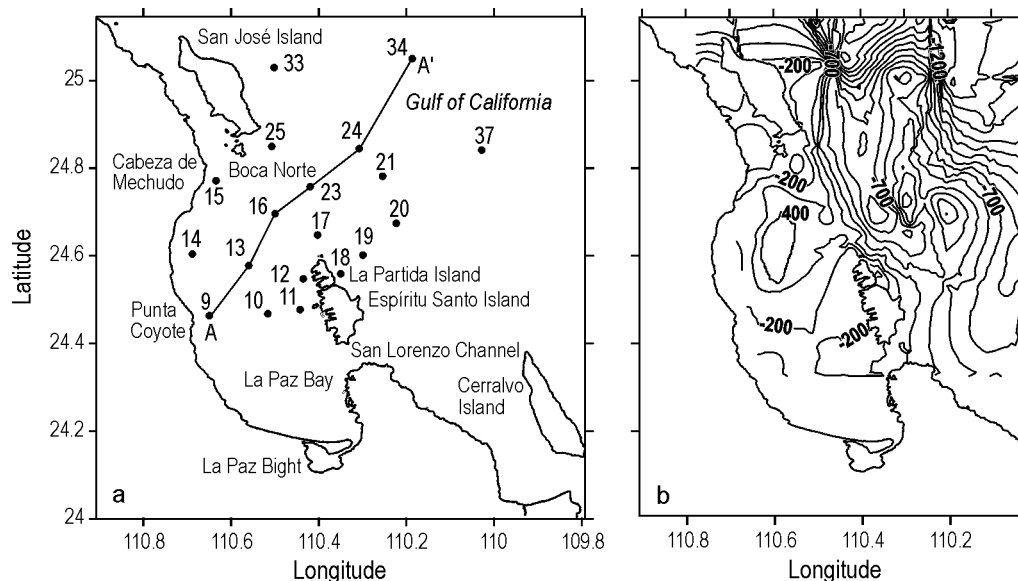


Figura 1. Localización del área de estudio, estaciones de muestreo y batimetría (en metros).
Figure 1. Location of the study area and sampling stations, and bathymetry (in meters).

alineamiento, junto con los rasgos batimétricos que continúan sobresaliendo hacia el noroeste, forman un umbral entre la bahía y el golfo. Silverberg *et al.* (2006) estudiaron el flujo vertical de materia particulada en la Cuenca Alfonso durante 2002 y encontraron una variación, tanto en composición como en intensidad, en cuestión de semanas.

Materiales y métodos

Los datos hidrográficos fueron obtenidos con un CTD Seabird modelo Seacat 19 en cuatro muestreos, tres realizados en 2001 (19 al 21 de mayo, 21 al 24 de julio y 29 al 31 de octubre) y uno en 2002 (11 al 14 de febrero), a bordo del B/O *Francisco de Ulloa* (fig. 1). Con la finalidad de determinar las propiedades hidrográficas de la zona de estudio, se obtuvieron registros de conductividad, profundidad y temperatura en una red de muestreo de 19 estaciones, y la salinidad fue calculada de acuerdo con procedimientos estándar (UNESCO 1991).

Con estos datos se realizaron perfiles acumulativos de temperatura y salinidad. Se utilizó una sección transversal o transecto (fig. 1) para mostrar la distribución vertical de temperatura y salinidad de la parte central de la Boca Norte, de Punta Coyote hacia el interior del Golfo (transecto A–A', estaciones 9 a 34). La densidad no se analizó debido a que presentó un comportamiento similar a la temperatura.

Mediante el uso de diagramas T-S se identificó la presencia de masas de agua en la zona de estudio, de acuerdo a la clasificación de masas de agua de Torres-Orozco (1993). La estratificación de la columna de agua se determinó a partir del cálculo del parámetro de estratificación ϕ (Joules por metro cúbico, J m^{-3}) (Simpson 1981), desde la superficie hasta 100 m de profundidad, eliminando las estaciones con los valores menores, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\phi = (1/h) \int_{-h}^0 (\rho(z) - \bar{\rho})gzdz$$

donde h es la profundidad, z es la coordenada vertical (positiva hacia la superficie), ρ es la densidad y g es la aceleración de la gravedad.

Resultados

Perfiles acumulados de temperatura

Durante mayo de 2001 la distribución de temperatura no presentó capa de mezcla y la temperatura superficial media fue de 23.7°C (fig. 2a, color rojo). Destaca la presencia de una termoclina intensa desde la superficie hasta los 100 m de profundidad, con un parámetro de estratificación de 152.23 J m^{-3} ; asimismo, se puede apreciar un gradiente de temperatura de 0.16°C m^{-1} en los primeros 50 m.

En julio de 2001 continuó ausente la capa de mezcla y la temperatura superficial media fue de 26.7°C (fig. 2a, color negro). Una termoclina intensa se extiende desde la superficie (28°C) hasta los 100 m y el valor de estratificación se ha

Material and methods

Hydrographic data were obtained using a Sea-Bird Seacat 19 CTD during four surveys, three conducted in 2001 (19–21 May, 21–24 July and 29–31 October) and one in 2002 (11–14 February), aboard the R/V *Francisco de Ulloa* (fig. 1). To determine the hydrographic properties in the study area, conductivity, depth and temperature measurements were made in a sampling grid of 19 stations, and salinity was calculated following standard procedures (UNESCO 1991).

Based on these data, cumulative temperature and salinity profiles were obtained. A transverse section or transect (fig. 1) was used to show the vertical distribution of temperature and salinity in the central part of the North Mouth, extending from Punta Coyote out into the gulf (transect A–A', stations 9 to 34). Density was not analyzed since it showed a similar behaviour to that of temperature.

The presence of water masses in the study area was determined using temperature-salinity (T-S) diagrams, according to Torres-Orozco's (1993) water mass classification. Water column stratification was determined based on the calculation of the stratification parameter ϕ (Joules per cubic meter, J m^{-3}) (Simpson 1981), from the surface to 100 m depth, eliminating the stations with the lowest values, as follows:

$$\phi = (1/h) \int_{-h}^0 (\rho(z) - \bar{\rho})gzdz$$

where h is the depth, z is the vertical coordinate (positive towards the surface), ρ is the density and g is the gravitational acceleration.

Results

Cumulative temperature profiles

In May 2001, the mixed layer was absent and mean surface temperature was 23.7°C (fig. 2a, red colour). Particularly noteworthy is the presence of an intense thermocline from the surface to 100 m depth, with a stratification parameter of 152.23 J m^{-3} . A temperature gradient of 0.16°C m^{-1} can be observed in the first 50 m.

In July 2001, the mixed layer was still absent and mean surface temperature was 26.7°C (fig. 2a, black colour). The intense thermocline extended from the surface (28°C) to 100 m and the stratification value increased to 201.52 J m^{-3} . There was a strong temperature gradient (0.19°C m^{-1}) in the first 50 m and the deepening process had begun.

In October 2001, a 30-m mixed layer was identified and the highest surface temperature (28°C) of all the surveys was recorded. The thermocline continued to deepen and was conspicuous below the mixed layer until 160 m depth, showing a temperature gradient (0.17°C m^{-1}) between the mixed layer and 50 m depth (fig. 2b, black colour). The stratification value recorded (295.02 J m^{-3}) was the highest of all the surveys.

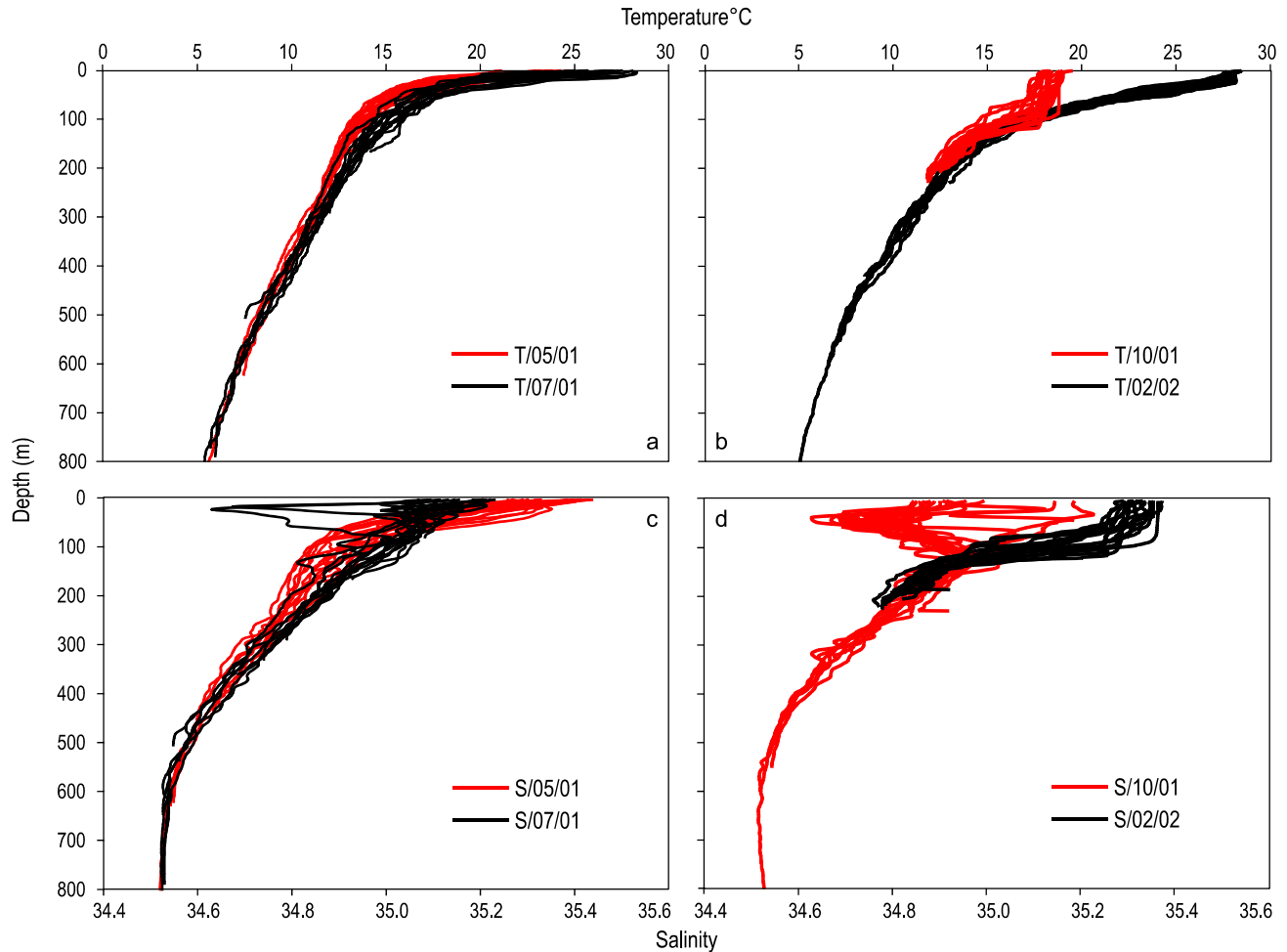


Figura 2. Perfiles de temperatura: (a) 19–21 de mayo y 21–24 de julio de 2001, y (b) 29–31 de octubre de 2001 y 11–14 de febrero de 2002. Perfiles de salinidad: (c) 19–21 de mayo y 21–24 de julio de 2001, y (d) 29–31 de octubre de 2001 y 11–14 de febrero de 2002.

Figure 2. Temperature profiles: (a) 19–21 May 2001 and 21–24 July 2001, and (b) 29–31 October 2001 and 11–14 February 2002. Salinity profiles: (c) 19–21 May 2001 and 21–24 July 2001, and (d) 29–31 October 2001 and 11–14 February 2002.

incrementado a 201.52 J m^{-3} . Se observa un fuerte gradiente de temperatura ($0.19^\circ\text{C m}^{-1}$) en los primeros 50 m, iniciándose el proceso de hundimiento de la termoclina.

Durante octubre de 2001 se detectó una capa de mezcla de 30 m y se registró la máxima temperatura superficial de todos los periodos analizados (28°C). La termoclina continuó su proceso de hundimiento, apareciendo conspicua debajo de la capa de mezcla y hasta los 160 m de profundidad, con un gradiente de temperatura ($0.17^\circ\text{C m}^{-1}$) entre la capa de mezcla y los 50 m de profundidad (fig. 2b, color negro). La estratificación fue la máxima de todo el estudio (295.02 J m^{-3}).

En febrero de 2002, el perfil acumulado de temperatura se obtuvo únicamente hasta 230 m de profundidad debido a problemas técnicos; sin embargo, se registró una inusual capa de mezcla de 100 m en la bahía y una de 80 m en el golfo. Además, se detectó la mínima temperatura superficial media (18.7°C) de todo el estudio y un drástico hundimiento y la consecuente disminución en la vertical de la termoclina (fig. 2b, color rojo). El valor de estratificación disminuyó sustancialmente a 23.6 J m^{-3} .

In February 2002, the cumulative temperature profile was only obtained to 230 m depth because of technical problems; however, an unusual mixed layer was observed of 100 m in the bay and 80 m in the gulf. Mean surface temperature (18.7°C) was the lowest of all the surveys. There was a drastic deepening of the thermocline and consequent vertical decrease (fig. 2b, red colour). The stratification value decreased significantly to 23.6 J m^{-3} .

Cumulative salinity profiles and T-S diagram

In May 2001, in the absence of the mixed layer, mean surface salinity was 35.35 (fig. 2c, red colour). A well-defined halocline was observed from the surface to 100 m depth, with an intense haline gradient (0.006 m^{-1}) between the surface and 50 m depth. The T-S diagram showed the presence of two water masses in the first 100 m depth: a large proportion of GCW and a lesser proportion of SSW. Two water masses were identified at greater depths, down to 800 m: SSW and PIW (fig. 3a, red colour).

Perfiles acumulados de salinidad y diagrama T-S

En ausencia de la capa de mezcla, durante mayo de 2001 se registró una salinidad superficial media de 35.35 (fig. 2c, color rojo). La estructura de la haloclina estuvo bien definida desde la superficie hasta 100 m de profundidad, con un intenso gradiente halino (0.006 m^{-1}) entre la superficie y 50 m de profundidad. En el diagrama T-S, en los primeros 100 m de profundidad se detectó la presencia de dos masas de agua: una gran proporción de AGC y ASS en menor proporción. A mayor profundidad y hasta los 800 m se identificaron otras dos masas de agua: ASS y AIP (fig. 3a, color rojo).

Al continuar durante julio de 2001 la ausencia de la capa de mezcla, se obtuvo una salinidad superficial media de 35.17. Cabe señalar la notable dispersión de los datos en los primeros 80 m de profundidad (fig. 2c, color negro). No se identificó haloclina y en su lugar se observó una disminución gradual de la salinidad, desde la superficie (35.26) hasta los 600 m (34.53). En los primeros 100 m el diagrama T-S muestra la presencia de tres masas de agua: AGC, ASS y ASE, esta última en cantidad mínima. A mayor profundidad y hasta los 800 m se encontró ASS y AIP (fig. 3a, color negro).

En octubre de 2001 se encontró una capa de mezcla de 30 m, con una salinidad superficial media de 34.92 (fig. 2d, color rojo). Destaca un mínimo de salinidad (34.65) a 40 m de profundidad, seguido de un incremento hacia los 125 m. En los datos se aprecia una dispersión en la superficie y por debajo de ésta, incluso hasta los 200 m. En el diagrama T-S se observa nuevamente la presencia de tres masas de agua desde la superficie hasta los 100 m: AGC drásticamente disminuida, ASS y una fuerte presencia de ASE. A mayor profundidad y hasta los 800 m se identificaron ASS y AIP (fig. 3b, color negro).

En febrero de 2002, la inusual capa de mezcla de 100 m en la bahía registró una salinidad superficial media de 35.33 (fig. 2d, color negro). La haloclina presenta un gradiente de 0.0041 por metro entre 100 m y 200 m de profundidad. En el diagrama T-S la capa de mezcla está constituida exclusivamente por AGC, y debajo de ésta y hasta los 230 m sólo se registró ASS (fig. 3b, color rojo).

Transectos de temperatura y sus valores de estratificación

En el transecto de mayo de 2001 (fig. 4a), la distribución de temperatura refleja la ausencia de la capa de mezcla. Se observaron las aguas del golfo ligeramente más calidas (23°C) en la capa superficial, y más frías (10°C) a 300 m, que las de la bahía. Se obtuvo una estratificación de 107.2 J m^{-3} en la bahía (estación 13), que se incrementó hasta 147 J m^{-3} hacia la región del golfo (estación 34). Se detectó una elevación tipo domo en las isothermas en la bahía alrededor de la estación 13.

En julio de 2001, sin capa de mezcla, se encontró más caliente (28°C) la región del golfo (fig. 4b). La estratificación resultó fuerte en la bahía (132.37 J m^{-3} ; estación 13), aunque menor que la del golfo (270.33 J m^{-3} ; estación 34). Otra vez aparece una estructura tipo domo alrededor de la estación 13, desde los 5 hasta los 100 m de profundidad.

In July 2001, with the continued absence of the mixed layer, mean surface salinity was 35.17. There was notable dispersion of the data in the first 80 m depth (fig. 2c, black colour). The halocline was not identified, but rather a gradual decrease in salinity was observed from the surface (35.26) to 600 m depth (34.53). The T-S diagram showed the presence of three water masses in the first 100 m: GCW, SSW and ESW, the last in minimum proportion. Two water masses were identified at greater depths, down to 800 m: SSW and PIW (fig. 3a, black colour).

In October 2001, in the presence of the 30-m mixed layer, mean surface salinity was 34.92 (fig. 2d, red colour). Salinity was minimum (34.65) at 40 m depth and increased until 125 m depth. Dispersion of the data was observed at the surface and below the surface until 200 m. The T-S diagram showed the presence of three water masses from the surface to 100 m depth: a significantly reduced proportion of GCW, SSW and strong presence of ESW. Two water masses were identified at greater depths, down to 800 m: SSW and PIW (fig. 3b, black colour).

In February 2002, when the unusual 100-m mixed layer occurred in the bay, mean surface salinity was 35.33 (fig. 2d, black colour). The halocline showed a gradient between 100 and 200 m depth (0.0041 per meter). In the T-S diagram, the mixed layer was occupied almost exclusively by GCW, and below it until 230 m depth, only SSW was observed (fig. 3b, red colour).

Temperature transects and stratification values

In the May 2001 transect (fig. 4a), the distribution of temperature revealed the absence of the mixed layer. Gulf waters were slightly warmer (23°C) at the surface and colder (10°C) at 300 m depth than bay waters. A stratification of 107.2 J m^{-3} was observed within the bay (station 13), increasing to 147 J m^{-3} towards the gulf (station 34). The isotherms showed a dome-type elevation in the vicinity of station 13 in the bay.

In July 2001 (fig. 4b), without the mixed layer, the gulf region was warmer (28°C). Stratification was strong in the bay (132.37 J m^{-3} , station 13), though lower than in the gulf (270.33 J m^{-3} , station 34). A dome-type structure was again observed around station 13, from 5 to 100 m depth.

In October 2001 (fig. 4c) there was a 2°C difference in mixed layer temperature between the bay and gulf. The presence of the dome-type structure around station 13 was not as pronounced, occurring between 14 and 60 m depth. As already mentioned, maximum stratification during the study period occurred in October, but with a value of 240.17 J m^{-3} in the bay (station 13) and of 324.61 J m^{-3} in the gulf (station 34).

Finally, in February 2002 (fig. 4d), in addition to the unusual occurrence of the 100-m mixed layer, the lowest stratification values of all the surveys were recorded: 4.16 J m^{-3} for the bay (station 13) and 42.67 J m^{-3} for the gulf. An elevation of the isotherms was observed from the bay towards the gulf.

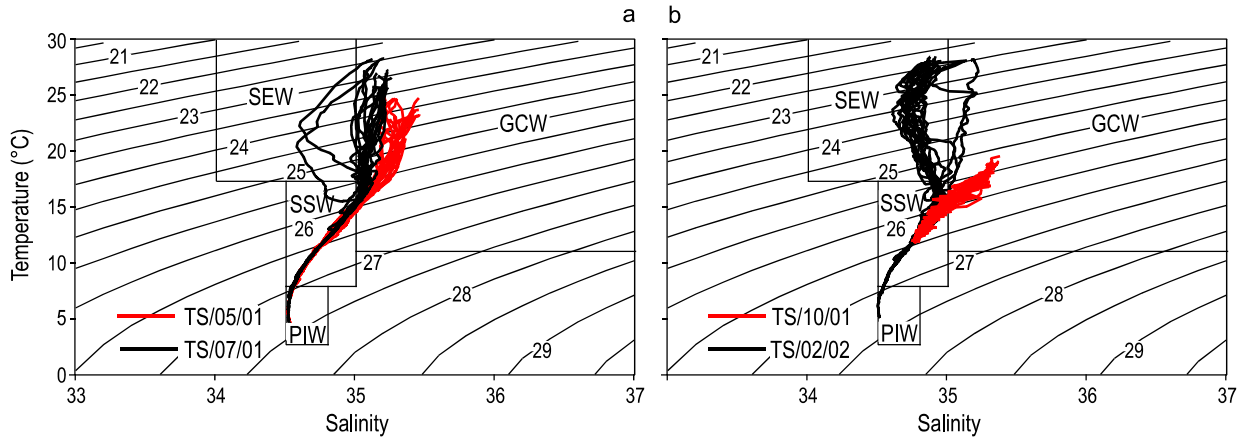


Figura 3. Diagramas T-S: (a) 19–21 de mayo y 21–24 de julio de 2001, y (b) 29–31 de octubre de 2001 y 11–14 de febrero de 2002. ESW = Agua Superficial Ecuatorial, SSW = Agua Subsuperficial Subtropical, PIW = Agua Intermedia del Pacífico y GCW = Agua del Golfo de California.

Figure 3. Temperature-salinity diagrams: (a) 19–21 May 2001 and 21–24 July 2001, and (b) 29–31 October 2001 and 11–14 February 2002. ESW = Equatorial Surface Water, SSW = Subtropical Subsurface Water, PIW = Pacific Intermediate Water and GCW = Gulf of California Water.

Para octubre de 2001 (fig. 4c), la capa de mezcla registró una diferencia en la temperatura de hasta 2°C de la bahía al golfo. La presencia de la estructura tipo domo alrededor de la estación 13 se muestra disminuida, ubicada entre los 14 y 60 m de profundidad. Como se mencionó anteriormente, en octubre también se observó la máxima estratificación de todo el periodo de estudio; sin embargo, en la bahía ésta fue de 240.17 J m⁻³ (estación 13), mientras que en el golfo fue de 324.61 J m⁻³ (estación 34).

Por último, en febrero de 2002 (fig. 4d), además de identificarse la inusual capa de mezcla de 100 m ya mencionada, se obtuvieron los valores mínimos de estratificación del presente estudio: 4.16 J m⁻³ para la bahía (estación 13) y 42.67 J m⁻³ en el golfo. Se observó una elevación de las isoterms, de la bahía hacia el golfo, destacando el afloramiento de la isoterma de 18°C, de 100 m de profundidad en la bahía hasta la superficie en el golfo (estación 24).

Transectos de salinidad

La distribución de la salinidad en mayo de 2001 (fig. 5a), que reitera la fuerte estratificación y la ausencia de la capa de mezcla, se debe a la presencia de dos masas de agua en la bahía (AGC y ASS); mientras que hacia el golfo, entre las estaciones 16 y 34 la distribución de salinidad se debe a la presencia de las tres masas de agua encontradas: AGC, ASS y AIP.

En julio de 2001, continuando con la ausencia de la capa de mezcla, la salinidad disminuyó gradualmente con respecto a la profundidad, excepto en la región del golfo (alrededor de la estación 34) donde se apreció una lengüeta subsuperficial con salinidad de 34.8 (fig. 5b). Esta distribución se debió a la presencia de dos masas de agua en la bahía (AGC y ASS), mientras que en el golfo la distribución se originó por la coexistencia de cuatro masas de agua (AGC, ASE, ASS y AIP).

La distribución de salinidad en octubre de 2001 (fig. 5c) mostró ausencia de estratificación en las capas superficiales y

Particularly noteworthy is the rising of the 18°C isotherm from 100 m depth in the bay to the surface in the gulf (station 24).

Salinity transects

The distribution of salinity in May 2001 (fig. 5a), which confirms the strong stratification and absence of the mixed layer, was caused by the presence of two water masses in the bay (GCW and SSW). Between stations 16 and 34, however, towards the gulf, the distribution of salinity was caused by the presence of three water masses (GCW, SSW and PIW).

In July 2001, with the continued absence of the mixed layer, salinity decreased gradually relative to depth, except in the gulf region (station 34), where a subsurface plume with salinity of 34.8 was observed (fig. 5b). In the bay this distribution was generated by the presence of two water masses (GCW and SSW), whereas in the gulf it was caused by the coexistence of four water masses (GCW, ESW, SSW and PIW).

In October 2001 (fig. 5c), the distribution of salinity indicated the absence of stratification in the surface layers and an important decrease in salinity, the latter mainly due to the presence of different water masses. In the bay (stations 9 to 16), the predominant water mass was ESW, followed by SSW, but GCW was notably absent. In the gulf (stations 16 to 34), four water masses were identified: EWS, SSW, PIW and considerably decreased GCW. A subsurface low-salinity (34.8) plume occurred at 40 m depth between the bay and gulf (stations 9 to 24).

Finally, in February 2002 (fig. 5d), in addition to the thick mixed layer and weak stratification, a well-defined halocline was observed in the bay (stations 13 to 16), with the presence of two water masses (GCW and SSW). In the gulf (stations 16 to 34), the halocline was less defined, possibly as a result of the interaction between SSW and GCW.

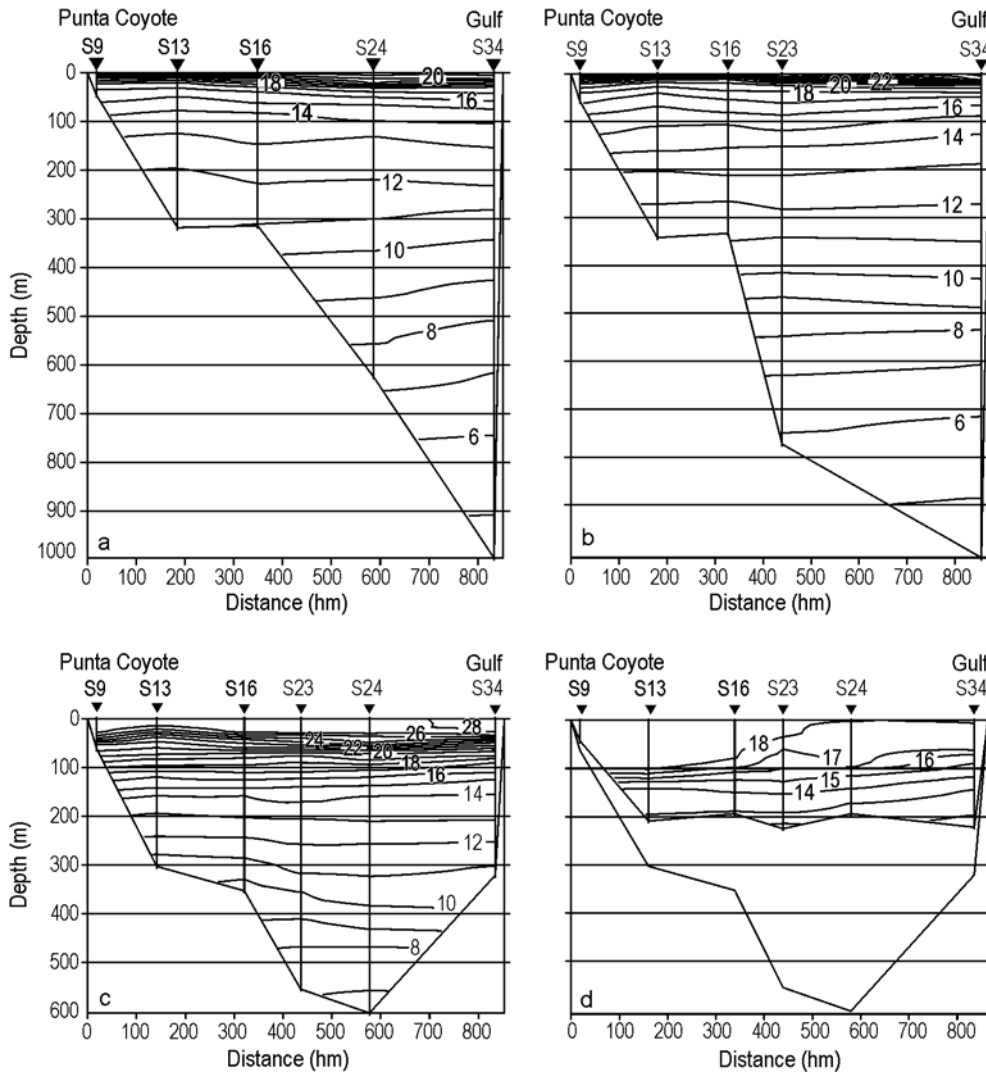


Figura 4. Transectos de temperatura: (a) 19–21 de mayo de 2001, (b) 21–24 de julio de 2001, (c) 29–31 de octubre de 2001 y (d) 11–14 de febrero de 2002.

Figure 4. Temperature transects: (a) 19–21 May 2001, (b) 21–24 July 2001, (c) 29–31 October 2001 and (d) 11–14 February 2002.

una importante disminución de la salinidad, esta última debido principalmente a la presencia de diferentes masas de agua en la zona. En la bahía se encontró principalmente ASE y, en menor proporción, ASS, sobresaliendo la ausencia del AGC (estaciones 9 a 16). Mientras tanto en el golfo (estaciones 16 a 34) se registraron cuatro masas de agua: ASE, ASS, AIP y AGC, esta última en menor proporción. Cabe señalar la presencia de una lengüeta subsuperficial de baja salinidad (34.8) a los 40 m de profundidad entre la bahía y el golfo (estaciones 9 a 24).

Finalmente, en febrero de 2002 (fig. 5d), además de una gruesa capa de mezcla y débil estratificación (fig. 5d) la bahía presentó una haloclina bien definida (estaciones 13 a 16), con la presencia de dos masas de agua (AGC y ASS), mientras que en el golfo la haloclina resultó menos definida (estaciones 16 a 34), posiblemente influenciada por la interacción del ASS y el AGC.

Discussion

The surface-layer temperature at the North Mouth showed significant seasonal variation, increasing gradually from May (23.69°C), to July (26.66°C), to October (28.03°C) 2001, and then decreasing in February 2002 (17.87°C). Surface water salinity also showed a seasonal pattern but contrary to that of temperature, since it was highest in May (35.35), lower in July (35.17) and lowest in October (34.92) 2001, increasing again in February 2002 (35.33). This variability in surface salinity is largely related to the presence of different water masses in the region. In May 2001, only GCW was identified, whereas in July, ESW and GCW (in greater proportion) were observed. In October 2001, ESW increased considerably, but there was a drastic decrease in GCW, while in February 2002, only GCW was observed.

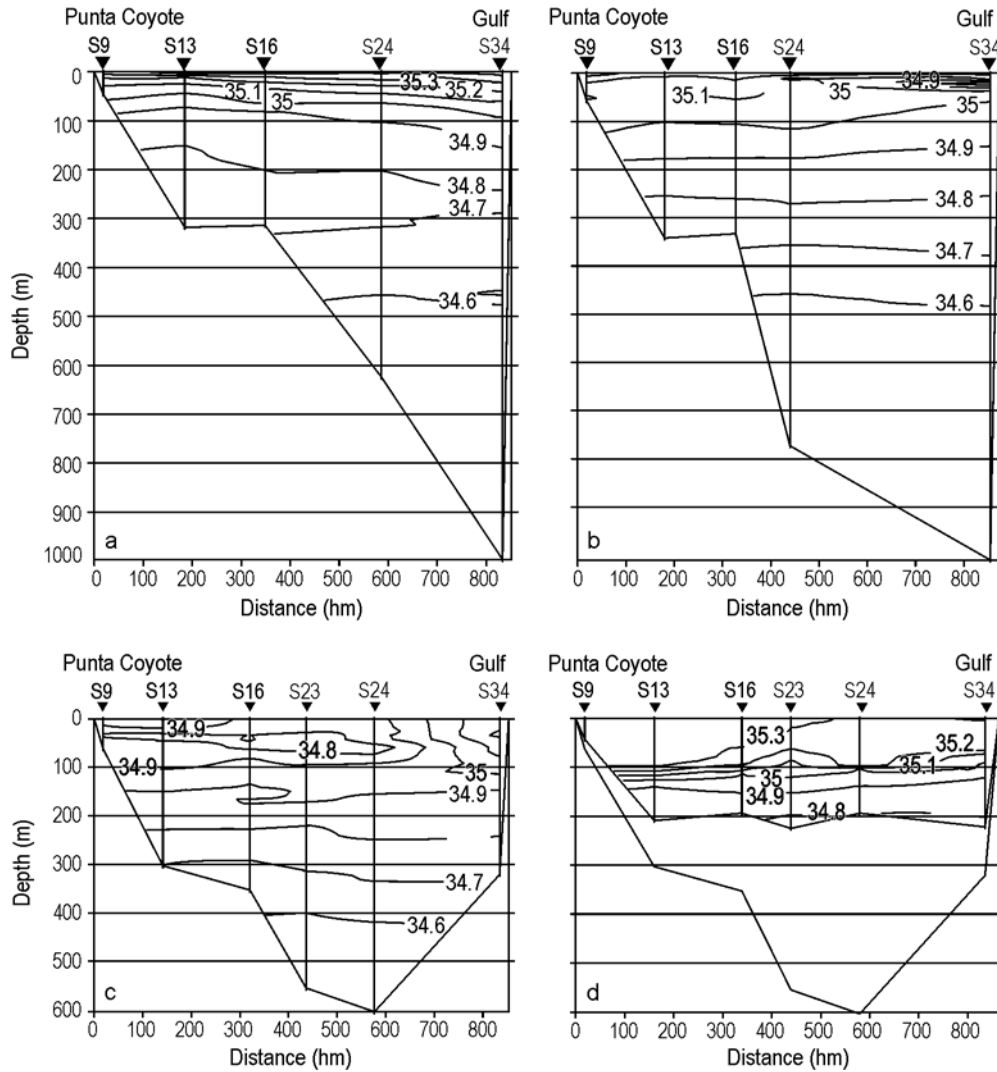


Figura 5. Transectos de salinidad: (a) 19–21 de mayo de 2001, (b) 21–24 de julio de 2001, (c) 29–31 de octubre de 2001 y (d) 11–14 de febrero de 2002.
Figure 5. Salinity transects: (a) 19–21 May 2001, (b) 21–24 July 2001, (c) 29–31 October 2001 and (d) 11–14 February 2002.

Discusión

La temperatura de las capas superficiales en la zona de la Boca Norte presentó variaciones estacionales significativas, incrementando gradualmente de mayo (23.69°C), a julio (26.66°C) y hasta octubre (28.03°C) de 2001, y disminuyendo hacia febrero de 2002 (17.87°C). La salinidad superficial también mostró un patrón estacional claro pero inverso al de la temperatura, registrándose la mayor en mayo de 2001 (35.35), disminuyendo para julio (35.17), y presentando un valor mínimo durante octubre (34.92), para después aumentar hacia febrero de 2002 (35.33). Esta variabilidad de la salinidad superficial responde, en buena parte, a la presencia de diferentes masas de agua en la región. Durante mayo de 2001 se registró únicamente AGC, mientras que en julio se encontró ASE, y AGC en una mayor proporción. En octubre se

From the water-mass analysis we can infer that PIW does not reach La Paz Bay because of the barrier created by the North Mouth sill. In October, GCW was not found in the bay due to the strong incursion of ESW during this period. On the other hand, waters with temperatures above 15°C showed considerable variability in their thermohaline properties. Such conditions were recorded in July and October (GCW, SSW and ESW), but more uniform temperatures were recorded in May and February and only GCW was detected. The characteristics of the waters with temperatures below 15°C were more uniform, and SSW and PIW were detected in all the seasons. The absence of the mixed layer and the presence of the thermocline and halocline in spring and summer, as well as the marked stratification, are associated with the strong solar radiation and relatively weak southeasterly and south-

incrementó de forma importante el ASE y resalta la drástica disminución de AGC, mientras que en febrero de 2002 se detectó solamente AGC.

Del análisis de masas de agua realizado se puede inferir que el AIP no llega a la Bahía de La Paz debido a la barrera que representa el umbral de la Boca Norte. Asimismo, en octubre no se registró AGC en la bahía debido a la fuerte incursión del ASE durante este período. Por otra parte, las aguas con temperaturas mayores a 15°C presentan una variabilidad considerable en sus propiedades termohalinas. En julio y octubre éstas se registraron a temperaturas mayores a 15°C (AGC, ASS y ASE), pero durante mayo y febrero se observaron condiciones más uniformes y sólo se detectó AGC. Las características de las aguas con temperaturas menores a 15°C fueron más uniformes, registrándose ASS y AIP durante todas las épocas. La ausencia de una capa de mezcla y la presencia superficial de la termoclina y la haloclina durante primavera y verano, así como la marcada estratificación, son el resultado de una fuerte radiación solar y de campos de viento relativamente débiles del sureste y sur-sureste en la región, lo cual coincide con lo reportado por Salinas-González *et al.* (2003) y Obeso-Nieblas *et al.* (2004). Salas (1966) y Marinone y Lavín (1997) mencionan que, en verano, aparecen vientos del sureste cuando un sistema de baja presión se localiza en la porción noreste del Golfo de California (Roden 1958), y desplazan aire cálido y húmedo sobre el golfo. Las velocidades de estos vientos son generalmente del orden de 5 m s⁻¹ y su humedad absoluta es alta (Badan-Dangon *et al.* 1991).

La presencia en otoño y, de manera más relevante en invierno, de una capa de mezcla, así como el hundimiento de la termoclina y la haloclina, fueron originados por los fuertes vientos del noroeste y norte que prevalecen en estos períodos, lo que coincide nuevamente con lo reportado por Salinas-González *et al.* (2003) y Obeso-Nieblas *et al.* (2004), y con lo encontrado por Jiménez *et al.* (1994) y Jiménez-Illescas (1996) en marzo de 1994. Estas condiciones meteorológicas son originadas a mayor escala en el Golfo de California por la influencia de los vientos estacionales que, durante esta época, son canalizados a lo largo de su eje longitudinal por las cadenas montañosas situadas en la Península de Baja California y las continentales. Este patrón de vientos ha sido previamente discutido por Salas (1996) y Marione y Lavín (1997), quienes señalan que tales vientos están sujetos a fluctuaciones estacionales como consecuencia de la migración del sistema de baja presión localizado sobre el occidente de México. Cuando el sistema de baja presión se encuentra en el lado oriental del golfo, que es la mayor parte del año, se presentan vientos del noroeste secos y fríos sobre el golfo, con velocidades de 10–12 m s⁻¹.

La elevación de las isotermas tipo domo observada en algunos periodos está asociada con la presencia de una estructura de tipo ciclónica en la parte profunda de la bahía. Este domo fue más evidente durante julio, prevaleció durante octubre y desapareció en febrero, corroborando otros trabajos que hacen referencia a una circulación ciclónica en el verano en la parte

southeasterly wind fields in the region, which coincides with that reported by Salinas-González *et al.* (2003) and Obeso-Nieblas *et al.* (2004). Salas (1966) and Marinone and Lavín (1997) mentioned that, in summer, southeasterly winds appear when a low-pressure system is located in the northeastern Gulf of California (Roden 1958), displacing warm, humid air over the gulf. These winds present speeds of about 5 m s⁻¹ and high absolute humidity (Badan-Dangon *et al.* 1991).

The presence of the mixed layer in autumn and, significantly, in winter, as well as the deepening of the thermocline and halocline were related to the strong northwesterly and northerly winds that prevail at this time of year; this again coincides with that reported by Salinas-González *et al.* (2003) and Obeso-Nieblas *et al.* (2004), and with that observed by Jiménez *et al.* (1994) and Jiménez-Illescas (1996) in March 1994. These meteorological conditions occur on a greater scale in the Gulf of California as a result of the influence of seasonal winds that, at this time of year, are channelled along its longitudinal axis by the mountain chains situated on the Baja California Peninsula and on the mainland. This wind pattern has been discussed by Salas (1996) and Marinone and Lavín (1997), who indicate that these winds are subject to seasonal fluctuations as a result of the migration of the low-pressure system over western Mexico. When this system is located over the eastern gulf, as occurs during most of the year, dry, cold northwesterly winds blow over the gulf, with speeds of 10–12 m s⁻¹.

The elevation of the dome-type isotherms observed in some seasons is associated with the presence of a cyclonic-type structure in the deep part of the bay. The dome-type elevation was most apparent in July, continued in October and disappeared in February, corroborating other studies that refer to a cyclonic circulation in summer in the central part of the bay (Monreal-Gómez *et al.* 2001, Obeso-Nieblas *et al.* 2004). This generates fluxes from the gulf to the bay, off Punta Mechudo, at the North Mouth, and from the bay to the gulf, off the coast of the Espíritu Santo-La Partida island complex.

The mixing process showed a pattern of seasonal variation. The process initiated in October and ended in February, when a maximum 100-m mixed layer was observed, while in May and July the mixed layer was absent. The thermocline presented a similar behaviour, occurring at the surface in May and initiating the deepening process in July, which continued in October and ended in February, when its maximum depth was recorded, together with a significant vertical reduction. These processes are closely related to the seasonal variability in stratification in the bay and gulf, the highest values corresponding to mid-autumn and the lowest to late winter.

This study shows important seasonal variability in temperature and salinity at the North Mouth of La Paz Bay, as well as the presence of different water masses in the region depending on the time of year, with marked differences between the bay and Gulf of California.

central de la bahía (Monreal-Gómez *et al.* 2001, Obeso-Nieblas *et al.* 2004). Esto origina flujos del golfo hacia el interior de la bahía, frente a Punta Mechudo, en la Boca Norte, y de la bahía hacia el golfo, frente a la costa del complejo insular Espíritu Santo-La Partida.

Al parecer, el proceso de mezcla en la región presenta un patrón estacional de variabilidad. Durante mayo y julio no se aprecia una capa de mezcla. En octubre se inicia el proceso de mezcla, el cual culmina durante febrero con una capa máxima de 100 metros. La termoclina tiene un comportamiento similar, localizándose durante mayo cerca de la superficie, en julio se comienza a hundir, en octubre continuó hundiéndose y en febrero registró su máxima profundidad, acompañada de una importante reducción en la vertical. Estos procesos están en estrecha relación con la variabilidad estacional de la estratificación en la bahía y en esta región del Golfo de California, cuyos valores son máximos a mediados de otoño y mínimos a fines de invierno.

Este estudio muestra una importante variabilidad estacional de la temperatura y la salinidad en la zona de la Boca Norte, así como la presencia según la época del año de diferentes masas de agua en la región, con marcadas diferencias entre la bahía y el golfo.

Agradecimientos

El presente estudio fue realizado con datos obtenidos a través de los proyectos CONACYT 34071-T y CGPI-20018002, éste último financiado por el Instituto Politécnico Nacional. Se agradece a los estudiantes del programa de Maestría en Manejo de Recursos Marinos del CICIMAR-IPN, por su participación en los cuatro cruceros denominados BAGOL. Agradecemos también al CICESE, y en particular a la tripulación del B/O *Francisco de Ulloa* su cooperación para este estudio.

Referencias

Badan-Dangon A, Dorman C, Merrifield M. 1991. The lower atmosphere over the Gulf of California. *J. Geophys. Res.* 96: 16887–16896.

Contreras F. 1988. Las Lagunas Costeras Mexicanas. Centro de Ecodesarrollo, Secretaría de Pesca, México, 236 pp.

Cruz-Orozco R, Mendoza-Maravillas A, Martínez-Noriega C. 1990. Profundidades y formas de la Bahía de La Paz. Geonotas No. 1. Departamento de Geología Marina, Universidad Autónoma de Baja California Sur, 90 pp.

Durazo R, Gaxiola-Castro G, Lavaniegos B, Castro-Valdez R, Gómez-Valdés J, Mascarenhas Jr. A Da S. 2005. Oceanographic conditions west of the Baja California coast, 202–2003: A weak El Niño and subarctic water enhancement. *Cienc. Mar.* 31: 537–552.

García E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación de Köppen. Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, 246 pp.

INEGI. 1994. Aspectos geográficos de Baja California Sur. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México, 30 pp.

Jiménez IAR, Obeso-Nieblas M, Alatorre MMA. 1994. Hidrología de la Bahía de La Paz. *Oceanología. Unidad de Educación en Ciencia y Tecnología de Mar*, 1: 115–131.

Acknowledgements

This study was supported by the Mexican Council of Science and Technology (CONACYT project 34071-T) and by the National Polytechnic Institute (IPN project CGPI-20018002). We thank the crew of the R/V *Francisco de Ulloa* (CICESE) and students of the Marine Resource Management M.Sc. program (CICIMAR-IPN) for their assistance during the four BAGOL cruises.

English translation by Christine Harris.

Jiménez A, Marinone SG, Parés-Sierra A. 2005. Efectos de la variabilidad espacial y temporal del viento sobre la circulación en el Golfo de California. *Cienc. Mar.* 31: 357–368.

Jiménez-Illescas AR. 1996. Análisis de procesos barotrópicos y baroclínicos en la Bahía de La Paz, BCS. Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México, DF, 212 pp.

Marinone SG, Lavín MF. 1997. Mareas y corrientes residuales en el Golfo de California. En: Lavín MF (ed.), *Contribuciones a la Oceanografía Física en México. Monografía No. 3, Unión Geofísica Mexicana*, pp. 113–139.

Monreal-Gómez MA, Molina-Cruz A, Salas-de-León DA. 2001. Water masses and cyclonic circulation in La Paz Bay, Gulf of California, during June 1998. *J. Mar. Syst.* 50: 305–315.

Obeso-Nieblas M. 2003. Variabilidad espaciotemporal de las condiciones oceanográficas de la Bahía de La Paz, BCS, México. Tesis doctoral, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, IPN, La Paz, BCS, México, 337 pp.

Obeso-Nieblas M, Shirasago B, Sánchez-Velasco L, Gaviño-Rodríguez JH. 2004. Hydrographic variability in Bahía de La Paz, BCS, Mexico, during the 1997–1998 El Niño. *Deep-Sea Res. II* 51: 689–710.

Roden GI. 1958. Oceanographic and meteorological aspects of the Gulf of California. *Pac. Sci.* 12: 21–45.

Salas PJ de J. 1996. El intercambio de agua sobre los umbrales del Golfo de California. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México, 65 pp.

Salinas GF. 2000. Mezcla turbulenta y transporte de masa en la Bahía y Ensenada de La Paz, BCS. Experimentación y modelación numérica. Tesis doctoral, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional, La Paz, Baja California Sur, México, 260 pp.

Salinas-González F, Zaytsev O, Vyacheslav M. 2003. Formación de la estructura termohalina del agua en la Bahía de La Paz de verano a otoño. *Cienc. Mar.* 29: 51–65.

Silverberg N, Aguirre F, Aguiñiga S, Romero N. 2006. Flujo vertical de material particulado en la Cuenca Alfonso, Bahía de La Paz, durante 2002. *Cienc. Mar.* 32: 73–82.

Simpson JH. 1981. The shelf sea front: Implication of their existence and behaviour. *Phil. Trans. R. Soc. London* 302: 531–546.

Torres-Orozco E. 1993. Análisis volumétrico de las masas de agua del Golfo de California. Tesis de maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México, 80 pp.

UNESCO. 1991. Processing of Oceanographic Station Data. JPOTS Edition. Panel, Paris, 138 pp.

*Recibido en noviembre de 2006;
aceptado en junio de 2007*