

VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA TEMPERATURA Y SALINIDAD EN LA ENTRADA DEL GOLFO DE CALIFORNIA, MÉXICO

SEASONAL VARIATION OF THE TEMPERATURE AND SALINITY AT THE ENTRANCE TO THE GULF OF CALIFORNIA, MEXICO

Rubén Castro^{1*}
Affonso S. Mascarenhas²
Reginaldo Durazo^{1, 3}
Curtis A. Collins³

¹ Facultad de Ciencias Marinas

² Instituto de Investigaciones Oceanológicas
Universidad Autónoma de Baja California
Apartado postal 453

Ensenada, C.P. 22800, Baja California, México

* E-mail: rubenc@faro.ens.uabc.mx

³ Department of Oceanography

Naval Postgraduate School
833 Dyer Road, Rm 328
Monterey, CA 93943, USA

Recibido en enero de 2000; aceptado en junio de 2000

RESUMEN

Se describe la variabilidad estacional en la entrada al Golfo de California utilizando datos de CTD en una sección a través de la entrada al golfo, la cual fue ocupada en ocho ocasiones entre 1992 y 1998. Se encontró que la variabilidad decrece rápidamente debajo de los 100 dbar; las desviaciones estándar mayores que 0.5°C y 0.05 para temperatura y salinidad, respectivamente, fueron confinadas a la capa superior de 150 dbar. El campo medio de salinidad fue asimétrico, con aguas de menor salinidad ($S < 34.6$) entre 25 y 75 dbar cerca de Sinaloa y aguas de mayor salinidad ($S > 34.8$) arriba de 50 dbar y entre 100 y 150 dbar cerca de Baja California. En la capa superior de 50 dbar se observó una termoclina estacional sobre la cual las temperaturas superficiales cambiaron de 21°C en febrero a 31°C en agosto. Debajo de los 100 dbar, la temperatura a una presión dada fue típicamente más fría en el centro de la sección, indicando flujo ciclónico (flujo de entrada al golfo cerca de Sinaloa y de salida del golfo cerca de Baja California). El enfriamiento subsuperficial en la mitad de la sección del golfo (flujo ciclónico) fue más fuerte durante el invierno y la primavera, época cuando el intercambio de calor entre el golfo y el Océano Pacífico es mayor. No se observó el calentamiento subsuperficial en la parte media de la sección que corresponde a un flujo anticiclónico. La distribución temporal y espacial de las masas de agua de mayor salinidad sugieren que los intercambios de calor se dan por la alternancia de flujos de entrada y salida de masas de agua de mayor temperatura (superficial) y menor temperatura (subsupsuperficial).

Durante el evento de El Niño 1997–1998 se observó un hundimiento de 50 dbar en la termoclina en noviembre de 1997, así como una disminución de 0.1 a 0.2 de la salinidad de las aguas arriba de la termoclina.

Palabras clave: Golfo de California, variación estacional, propiedades termohalinas, El Niño.

ABSTRACT

Seasonal variability at the entrance to the Gulf of California is described using high resolution CTD data from a section across the entrance to the gulf that was occupied eight times between 1992 and 1998. Variability decreased rapidly below 100 dbar, so that standard deviations exceeding 0.5°C and 0.05 for temperature and salinity, respectively, were confined to the upper 150 dbar. The mean salinity field was asymmetric, with fresher waters ($S < 34.6$) between 25 and 75 dbar next to Sinaloa and saltier waters ($S > 34.8$) above 50 dbar and between 100 and 150 dbar near Baja California. A seasonal thermocline developed in the upper 50 dbar, increasing from 21°C in February surface temperatures to 31°C in August. Below 100 dbar, temperature at a given pressure was typically colder in the center of the section, indicating cyclonic flow (flow into the gulf next to Sinaloa and out of the gulf next to Baja California). The subsurface mid-gulf cooling (cyclonic flow) was strongest during winter and spring when the exchange of heat between the gulf and the Pacific Ocean is large. Subsurface mid-gulf heating (corresponding to anticyclonic flow) was not observed. Temporal and spatial distribution of saline water masses suggests that heat exchanges take place by alternating the inflow and outflow of warm (surface) and cold (subsurface) water masses. The 1997–1998 El Niño resulted in a 50 dbar deepening of the thermocline in November 1997, as well as a freshening of 0.1 to 0.2 of waters above the thermocline.

Key words: Gulf of California, seasonal variation, thermohaline properties, El Niño.

INTRODUCCIÓN

El Golfo de California es el único mar marginal del Océano Pacífico oriental subtropical. Está localizado en el noroeste de México, entre los estados de Sonora y Sinaloa en el este y la península de Baja California (BC) en el oeste; hacia el sur, se comunica con el Océano Pacífico. El Golfo de California puede ser considerado como un laboratorio natural, dentro del cual coexisten fenómenos físicos de diferentes escalas espaciales y temporales. Usualmente, se ha dividido en varias regiones topográficas asociadas con cuencas oceánicas individuales, que aumentan en profundidad hacia la boca del golfo. En cada una de estas regiones se observan diferencias en los procesos físicos que controlan la circulación y la estructura termohalina. La entrada del golfo

INTRODUCTION

The Gulf of California is the only marginal sea of the eastern subtropical Pacific Ocean. It is located in northwestern Mexico, with the states of Sonora and Sinaloa lying to the east and the peninsula of Baja California (BC) to the west, and with open communication with the Pacific Ocean to the south. The Gulf of California can be considered a unique natural laboratory, in which physical phenomena of differing space and time scales coexist. It is usually subdivided into several topographic regions associated with individual ocean basins, which increase in depth toward the mouth of the gulf. Differences have been observed in the physical processes that control the circulation and the thermohaline structure in each of these basins. Pescadero Basin (PB)

es de cerca de 200 km de ancho, con profundidades que se extienden hasta los 2500 m en la Cuenca Pescadero (CP), lo cual permite un intercambio libre entre el Pacífico y el golfo.

Las aguas en la entrada al golfo están en una zona de transición compleja. Los vientos son estacionales: durante el invierno vienen del noroeste, con velocidades de 8–12 m s⁻¹, y durante el verano vienen del sureste, con ~5 m s⁻¹ (Douglas *et al.*, 1993). En primavera, el Agua de la Corriente de California (ACC) se esparce a través de toda la entrada, mientras que en otoño, la Corriente Costera de Costa Rica fluye a través de la entrada, transportando Agua Superficial Tropical (AST) (Wyrтки, 1967). Como el golfo es una cuenca de evaporación, se forma en su interior una agua de mayor salinidad conocida como Agua del Golfo de California (AGC); por tanto, el balance de masa requiere de un flujo hacia dentro del golfo. El calentamiento diferencial del golfo y del Pacífico requieren un intercambio de aguas entre el Pacífico y el golfo (Castro *et al.*, 1994; Beron-Vera y Ripa, 2000). Finalmente, la variabilidad interanual asociada con el fenómeno de El Niño afecta las condiciones en el golfo al producir anomalías positivas del nivel del mar, calentamiento en la capa superior, y disminución en la salinidad de 0.1 a 0.2 (Robles y Marinone, 1987; Lavín *et al.*, 1997).

Los estudios de circulación en la boca del golfo indican un patrón complejo en el flujo, con variaciones espaciales y temporales en los flujos de entrada y salida (Roden, 1972; Álvarez-Sánchez *et al.*, 1978; Collins *et al.*, 1997). Las observaciones de deriva de barcos sugieren un flujo ciclónico en invierno y un flujo anticiclónico en verano (Wyrтки, 1965). Mediciones de corrientes y cálculos de transportes en la entrada al golfo durante abril, mayo y diciembre de 1992, sugieren que el flujo hacia dentro del golfo ocurre cerca de Sinaloa y el flujo hacia fuera es a lo largo de

lies at the entrance to the gulf, with depths that exceed 2500 m and a breadth of about 200 km, allowing for free exchange between the waters of the Pacific and the gulf.

The waters at the entrance to the gulf lie in a complex oceanographic transition zone. Winds are seasonal: northwesterly during winter, 8–12 m s⁻¹, and southeasterly during summer, ~5 m s⁻¹ (Douglas *et al.*, 1993). In spring, California Current Waters (CCW) spread across the entrance, while in autumn, the Costa Rica Coastal Current flows across the entrance, transporting Tropical Surface Waters (TSW) (Wyrтки, 1967). Since the gulf is an evaporative basin, saline water called Gulf of California Water (GCW) is formed, and mass balance requires flow into the gulf. Differential heating of the gulf and the Pacific also requires exchange of waters between the Pacific and the gulf (Castro *et al.*, 1994; Beron-Vera and Ripa, 2000). Finally, interannual variability associated with El Niño affects conditions in the gulf, producing positive sea level anomalies, warming of the upper layer, and 0.1 to 0.2 freshening (Robles and Marinone, 1987; Lavín *et al.*, 1997).

Circulation studies at the mouth of the gulf indicate a complex flow pattern, with spatial and temporal variations of the inflow and outflow (Roden, 1972; Álvarez-Sánchez *et al.*, 1978; Collins *et al.*, 1997). Ship-drift observations suggest cyclonic flow in winter and anticyclonic flow in summer (Wyrтки, 1965). Transport and current observations at the entrance to the gulf during April, May and December 1992, suggested that inflow occurred next to Sinaloa and that outflow took place along BC (Collins *et al.*, 1997). Kelvin waves (Beier, 1997; Ripa, 1997) and mesoscale eddies are often present, and smaller scale frontal instabilities have been observed in satellite images (Collins *et al.*, 1997).

To better understand the variability and patterns of flow at the entrance to the gulf, we

BC (Collins *et al.*, 1997). Es frecuente la presencia de ondas de Kelvin (Beier, 1997; Ripa, 1997) y giros de mesoescala. Imágenes de satélite han indicado también inestabilidades frontales de pequeña escala (Collins *et al.*, 1997).

Para un mejor entendimiento de la variabilidad y los patrones de flujo en la entrada al golfo, desde 1992 se han realizado mediciones hidrográficas a través de la sección de CP. Este estudio resume los resultados de estas mediciones, enfocándose sobre condiciones medias y la variación estacional de la temperatura, salinidad y densidad.

MÉTODOS

Se utilizan en este estudio los datos hidrográficos de ocho cruceros oceanográficos en el transecto entre Cabo Pulmo, BC, y El Dorado, Sinaloa (fig. 1). A lo largo de esta línea se realizaron lances de CTD (conductividad/temperatura/presión). Para resolver la variabilidad de mesoescala, el espaciamiento entre estaciones fue muy cercano, de aproximadamente 10 km. La tabla 1 muestra las fechas de los cruceros. Se obtuvieron dos secciones para cada estación del año; por ejemplo, en invierno (diciembre y febrero) se midió en 1992 y 1994. Con los datos de diferentes años se formó un ciclo anual. La sección de noviembre de 1997 fue realizada en un evento de El Niño, lo cual contrasta con el ciclo estacional normal.

La calibración, recolección y procedimiento en el procesado de los datos fueron realizados de acuerdo con procedimientos estándar (UNESCO, 1991), y los detalles se han reportado en Rago *et al.* (1992), Blanco *et al.* (1995, 1996) y Larios *et al.* (1995). Los lances de CTD se efectuaron desde la superficie hasta el fondo, excepto para el crucero de octubre 1994, donde la profundidad máxima fue de 1200 m debido a la longitud del cable hidrográfico disponible.

have made hydrographic measurements along a section across PB beginning in 1992. This paper summarizes the results of these measurements, focusing on mean conditions and the seasonal variation of the temperature, salinity and density.

METHODS

Hydrographic data from eight oceanographic cruises along a transect between Cabo Pulmo, BC, and El Dorado, Sinaloa, were used in this study (fig. 1). CTD (conductivity/temperature/pressure) casts were carried out at stations along this line. The stations were spaced closely together, approximately 10 km, in order to resolve mesoscale variability. Table 1 lists cruise dates. Two sections were obtained for each season, i.e., the winter (December through February) season was sampled in 1992 and 1994. An annual cycle was then formed with data from different years. The November 1997 section sampled an El Niño event and these data are contrasted with the normal seasonal cycle.

Calibration, collection and processing procedures were carried out according to standard procedures (UNESCO, 1991), and details have been reported in Rago *et al.* (1992), Blanco *et al.* (1995, 1996) and Larios *et al.* (1995). The CTD casts extended from the surface to the bottom, except for the October 1994 cruise, when the maximum depth was 1200 m due to the length of the hydrographic cable available.

Potential temperature, $\theta_{xp}(j)$, and salinity, $S_{xp}(j)$, for individual cruises, j , were objectively mapped to a 10 km by 10 dbar grid, yielding $\hat{\theta}_{xp}(j)$ and $\hat{S}_{xp}(j)$ (Carter and Robinson, 1987).

A Gaussian covariance function, e^{-r^2/C^2} , where $r^2 = \Delta x^2 + (b\Delta p)^2$, $b = 1$ km/dbar, and $C = 25$ km, was used for this objective analysis. Charts of density anomaly, $\hat{\gamma}_{\theta_{xp}}(j)$, for each cruise were derived from the objectively

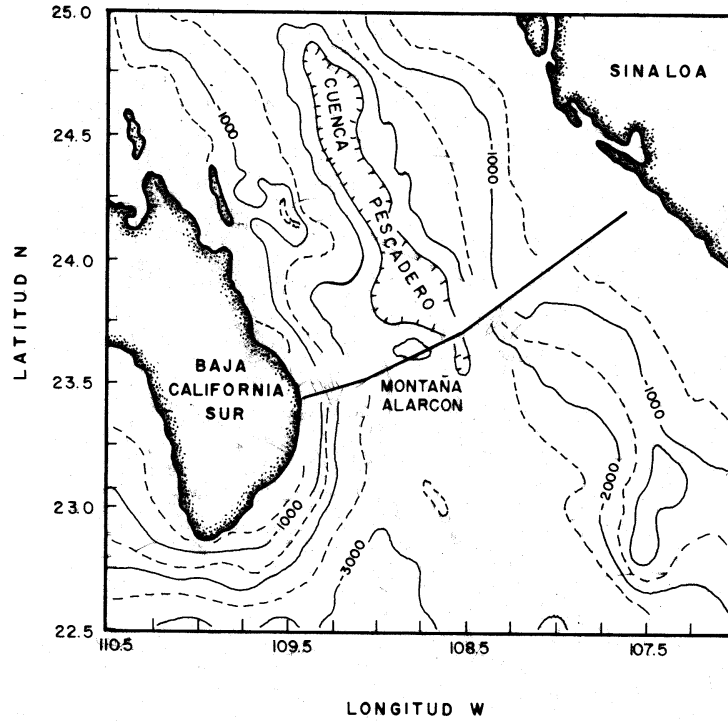


Figura 1. Localización de la sección hidrográfica en la entrada al Golfo de California. Los lances de CTD (conductividad/temperatura/presión) se realizaron a intervalos de 10 km a lo largo de esta sección.

Figure 1. Chart showing location of the hydrographic section at the entrance to the Gulf of California. Soundings with a CTD (conductivity/temperature/pressure) took place at 10-km intervals along this section.

Los campos de temperatura potencial, $\theta_{xp}(j)$, y salinidad, $S_{xp}(j)$, para cada cruceo j , fueron interpolados para obtener $\hat{\theta}_{xp}(j)$ y $\hat{S}_{xp}(j)$, utilizando un análisis objetivo con una malla de $\Delta x = 10$ km y $\Delta p = 10$ dbar de resolución espacial (Carter y Robinson, 1987). Para el análisis objetivo, se utilizó una función de covarianza gaussiana, e^{-r^2/C^2} , donde $r^2 = \Delta x^2 + (b\Delta p)^2$, $b = 1$ km/dbar, y $C = 25$ km. Para cada cruceo se obtuvieron mapas de anomalía de densidad, $\hat{\gamma}_{\theta_{xp}}(j)$, a partir de los mapas objetivos de temperatura y salinidad utilizando

mapped estimates of temperature and salinity using the 1980 equation of state (UNESCO, 1991). Mean values, $\langle \theta_{xp} \rangle$, $\langle S_{xp} \rangle$ and $\langle \hat{\gamma}_{\theta_{xp}} \rangle$ were then calculated from the eight objectively mapped charts. Finally, anomalies for a given cruise, j , were calculated: $\hat{\theta}'_{xp}(j) = \hat{\theta}_{xp}(j) - \langle \theta_{xp} \rangle$ and $\hat{S}'_{xp}(j) = \hat{S}_{xp}(j) - \langle S_{xp} \rangle$.

RESULTS

The water mass characteristics at the entrance to the Gulf of California are shown in

Tabla 1. Lista de los cruceros en la entrada del Golfo de California.

Table 1. List of the cruises at the entrance to the Gulf of California.

Mes/día	Año	Buque	Lances
Febrero 8–9	1994	<i>Francisco de Ulloa</i>	14
Mayo 2–5	1992	<i>DeSteiguer</i>	19
Mayo 28–30	1998	<i>Francisco de Ulloa</i>	20
Agosto 2–4	1998	<i>Francisco de Ulloa</i>	20
Agosto 13–15	1995	<i>El Puma</i>	21
Octubre 31–noviembre 1	1994	<i>A. de Humboldt</i>	20
Noviembre 19–20	1997	<i>Francisco de Ulloa</i>	23
Diciembre 29–31	1992	<i>Point Sur</i>	20

la ecuación de estado 1980 (UNESCO, 1991). Los valores medios, $\langle \hat{\theta}_{xp} \rangle$, $\langle \hat{S}_{xp} \rangle$ y $\langle \hat{\gamma}_{\theta, xp} \rangle$, se calcularon a partir de los ocho mapas objetivos. Finalmente, se calcularon las anomalías para un crucero dado, j : $\hat{\theta}'_{xp}(j) = \hat{\theta}_{xp}(j) - \langle \hat{\theta}_{xp} \rangle$ y $\hat{S}'_{xp}(j) = \hat{S}_{xp}(j) - \langle \hat{S}_{xp} \rangle$.

RESULTADOS

Las características de las masas de agua en la entrada del Golfo de California para los datos obtenidos en los ocho cruceros se muestran en el diagrama de θ/S (fig. 2). Los intervalos definidos para las masas de agua en la figura 2 son los usados por Torres-Orozco (1993) y delimitan los intervalos de θ/S para las seis masas de agua que han sido observadas en la CP. Para aguas más frías (más densas) que 12°C ($\gamma_{\theta} = 26.5 \text{ kg m}^{-3}$), las características del agua a cualquier profundidad fueron muy uniformes comparadas con las aguas de mayor temperatura. A 12°C, la salinidad media fue de 34.7 y disminuye conforme decrece (aumenta) la temperatura (densidad), hasta llegar a un mínimo (34.55) en el núcleo del Agua

the θ/S diagram (fig. 2) for data collected during the eight cruises. Water mass definitions in figure 2 are those used by Torres-Orozco (1993) and delineate the θ/S ranges for six water masses that have been observed in PB. For waters colder (denser) than 12°C ($\gamma_{\theta} = 26.5 \text{ kg m}^{-3}$), the water characteristics at any given depth were remarkably uniform compared to those for warmer waters. At 12°C, the mean salinity was 34.7 and this gradually freshened with decreasing (increasing) temperature (density), reaching a minimum (34.55) at the core of Pacific Intermediate Water, where temperature was 6°C. At the bottom of PB, the thermohaline properties of Pacific Deep Water were 1.5°C and 34.68.

For waters warmer than 12°C, there was considerable variability of thermohaline properties. For some cruises, both GCW and CCW waters were observed (August 1995, October/November 1994 and December 1992), while other cruises had more uniform water conditions (August 1988). Waters of the surface mixed layers were indicated by clusters of points of similar characteristics at the upper end of the θ/S curve for a given cruise. Seasonal warming of these surface waters is

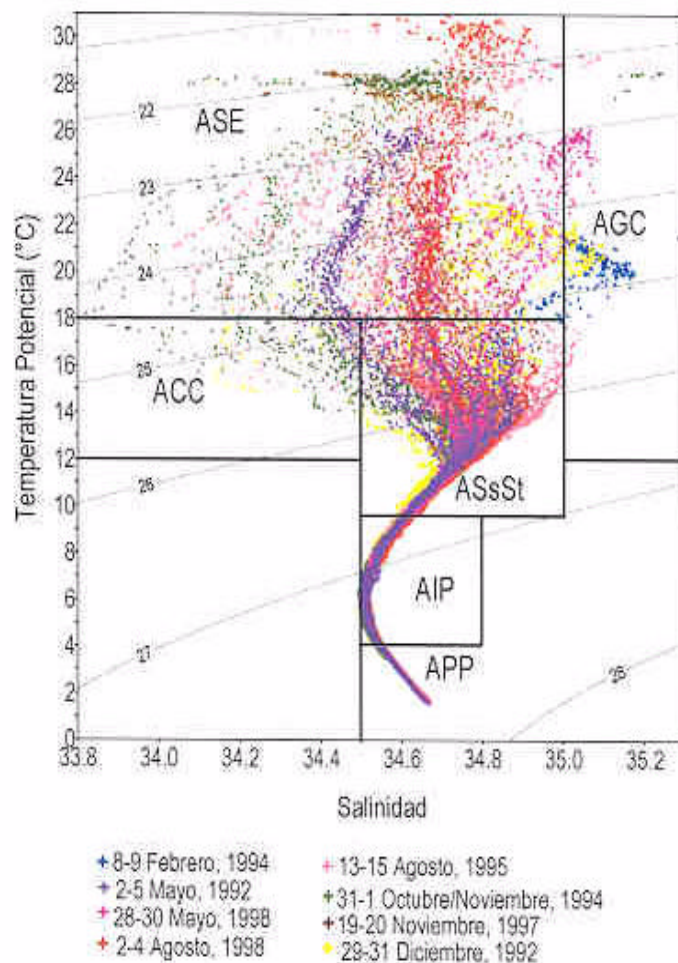


Figura 2. Diagrama de temperatura y salinidad para los lances de CTD en la entrada del Golfo de California. ASE = Agua Superficial Ecuatorial, AGC = Agua del Golfo de California, ACC = Agua de la Corriente de California, ASsSt = Agua Subsuperficial Subtropical, AIP = Agua Intermedia del Pacífico y APP = Agua Profunda del Pacífico. Las fronteras de las masas de agua fueron tomadas de Torres-Orozco (1993).

Figure 2. Temperature and salinity diagram for CTD soundings at the entrance to the Gulf of California. ASE = Tropical Surface Water, AGC = Gulf of California Water, ACC = California Current Water, ASsSt= Subtropical Subsurface Water, AIP = Pacific Intermediate Water and APP = Pacific Deep Water. Water mass boundaries are from Torres-Orozco (1993).

Intermedia del Pacífico, donde la temperatura fue de 6°C. En el fondo de la CP, las propiedades termohalinas del Agua Profunda del Pacífico fueron de 1.5°C y 34.68.

Para aguas con temperaturas mayores que 12°C, hubo una variabilidad considerable en las propiedades termohalinas. En algunos cruces se observó tanto el AGC como el ACC (agosto de 1995, octubre/noviembre de 1994 y diciembre de 1992), mientras que otros cruces presentaron condiciones más uniformes en sus propiedades (agosto de 1998). Las aguas de la capa superficial están indicadas por agrupamientos de puntos de características similares en el extremo superior de la curva de θ/S para cada crucero. El calentamiento estacional de las aguas superficiales fue claramente evidente, pues las temperaturas en febrero de 1994 (21.2°C) fueron mucho más frías que las observadas en agosto de 1995 y agosto de 1998 (30.9°C). Estos resultados validan las mediciones de satélite AVHRR en esta región presentadas por Soto-Mardones *et al.* (1999), quienes reportaron intervalos de temperatura desde 21°C en febrero hasta 30.5°C en septiembre.

La salinidad superficial no presentó un patrón estacional claro: las aguas superficiales aparecen más salinas (>35.0) para las dos secciones de invierno (diciembre de 1992 y febrero de 1994), pero la salinidad superficial fue también de este valor en mayo de 1998. Para los otros cruces, el rango de salinidad en la superficie fue de 34.6 a 34.7.

Nótese que entre las densidades superficiales de $\gamma_{\theta} = 24.5 \text{ kg m}^{-3}$ y $\gamma_{\theta} = 26.0 \text{ kg m}^{-3}$, los extremos de salinidad representan ACC y AGC. En caso de que estas aguas se encuentren yuxtapuestas, la mezcla isopical podría formar el Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt) cálida, así como el AST fría. Como consecuencia, se requiere tener cuidado al aplicar la técnica tradicional de análisis de masas de agua en esta región.

clearly evident as February 1994 waters (21.2°C) were much cooler than those observed in August 1995 and August 1998 (30.9°C). These results validate the AVHRR measurements in this region presented by Soto-Mardones *et al.* (1999), who reported temperatures ranging from 21°C in February to 30.5°C in September.

A seasonal pattern of surface salinity was not as clear: surface waters appeared most saline (>35.0) for the two winter sections (December 1992 and February 1994), but surface salinity was this high in May 1998 as well. For other cruises, surface salinity ranged from 34.6 to 34.7.

Note that between density surfaces $\gamma_{\theta} = 24.5 \text{ kg m}^{-3}$ and $\gamma_{\theta} = 26.0 \text{ kg m}^{-3}$, salinity extremes represent CCW and GCW. Should these waters become juxtapositioned, isopycnal mixtures of these waters could form the warmer Subtropical Subsurface Waters (StsW), as well as cooler TSW. Therefore, care is required in applying traditional water mass analysis techniques in this region.

Figures 3 and 4 present the θ and S fields, respectively, for each cruise for the upper 500dbar layer. The density field is not presented since it is similar to the temperature field. The temperature sections (fig. 3) show a clear pattern of seasonal warming and associated development of the seasonal thermocline. Coldest upper ocean temperatures were observed in February 1994 (fig. 3a); the 20°C isotherm at about 50 dbar depth marks the bottom of the seasonal thermocline. Sea surface temperatures increased to a maximum of 30.9°C in August 1998 (fig. 3d) and the 20°C isotherm sank to ~75 m. By November (fig. 3f, g), near surface waters had cooled to ~27°C and in December 1992 (fig. 3h), to ~22°C. Warmest surface waters were usually found over the Sinaloa shelf, but this was not always the case, e.g., May 1998 (fig. 3c) and October/November 1994 (fig. 3f).

Las figuras 3 y 4 presentan, respectivamente, los campos de θ y S para cada crucero para la capa superior de 500 dbar. El campo de densidad no se presenta debido a que muestra una distribución similar al campo de temperatura. Las secciones de temperatura (fig. 3) muestran el claro patrón del calentamiento estacional, el cual está asociado con el desarrollo de la termoclina estacional. Las temperaturas más frías en la capa superior del océano se observaron en febrero de 1994 (fig. 3a); la isoterma de 20°C a 50 dbar de profundidad marca el fondo de la termoclina estacional. Las temperaturas superficiales se incrementaron hasta un máximo de 30.9°C en agosto de 1998 (fig. 3d) y la isoterma de 20°C se hundió hasta ~75 dbar. Para noviembre (figs. 3f, g), las aguas cerca de la superficie disminuyeron su temperatura hasta ~27°C y en diciembre de 1992 (fig. 3h), hasta ~22°C. Las aguas superficiales de mayor temperatura se observaron frecuentemente sobre la plataforma de Sinaloa, aunque esto no siempre fue el caso, e.g., mayo de 1998 (fig. 3c) y octubre/noviembre de 1994 (fig. 3f).

Un segundo rasgo que destaca en las secciones de temperatura fue la concavidad (domo) de las isotermas en la termoclina principal en la parte central de la CP. Este domo fue más prominente en mayo de 1992 (fig. 3b), cuando la isoterma de 10°C ascendió desde su parte más profunda a 370 dbar sobre la pendiente continental hasta los 250 dbar, a una distancia de 80 km de BC. En mayo de 1998 (fig. 3c) el domo no se presentó tan fuerte, con la isoterma de 10°C a una profundidad de 290 dbar, a una distancia de 60 km de BC. El domo estuvo ausente en agosto de 1998 (fig. 3d) y octubre/noviembre de 1994 (fig. 3f), y muy débil en agosto de 1995 (fig. 3e), pero reapareció en noviembre de 1997 (fig. 3g) y diciembre de 1992 (fig. 3h). En el último caso, la isoterma de 10°C subió hasta los 300 dbar a una distancia de 100 km de BC.

A second prominent feature of the temperature sections was the doming of the isotherms that occurred in the main thermocline over the central portion of PB. This was most prominent in May 1992 (fig. 3b), when the 10°C isotherm shoaled from about 370 dbar over the slope to a depth of 250 dbar at a distance of 80 km from BC. In May 1998 (fig. 3c), the doming was not as strong, with the 10°C isotherm reaching a depth of 290 dbar at a distance of 60 km from BC. The doming was absent in August 1998 (fig. 3d) and October/November 1994 (fig. 3f), and very weak in August 1995 (fig. 3e), but reappeared in November 1997 (fig. 3g) and December 1992 (fig. 3h). In the latter case, the 10°C isotherm shoaled to 300 dbar at a distance of 100 km from BC.

Two other features were noticeable in the temperature sections. In November 1997 (fig. 3g) the warming associated with the 1997–1998 El Niño resulted in a deepening of about 50 dbar for most isotherms. The August 1995 section (fig. 3e) was occupied a few days after tropical storm Flossie (Navarro-Olache *et al.*, 1997) and coastal upwelling was observed next to BC. The latter result suggests that coastal upwelling, which is commonly seen in AVHRR images at higher latitudes in the gulf (Soto-Mardones *et al.*, 1999), occurs less frequently in PB.

As noted above, there was no clear temporal pattern associated with the salinity distribution (fig. 4). The lower boundary of the complex upper ocean salinity field was 34.7 (fig. 2), which was found between 200 and 300 dbar (fig. 4). In February 1994 (fig. 4a), the salinity increased from this depth to 35.1 near the surface, but in other months a complex pattern of salinity minima and maxima was observed. The only generalization that is possible regarding the upper ocean salinities was that the salinity tended to be somewhat higher on the western side of the gulf. GCW ($S > 34.9$, shaded in fig. 4) was observed in February

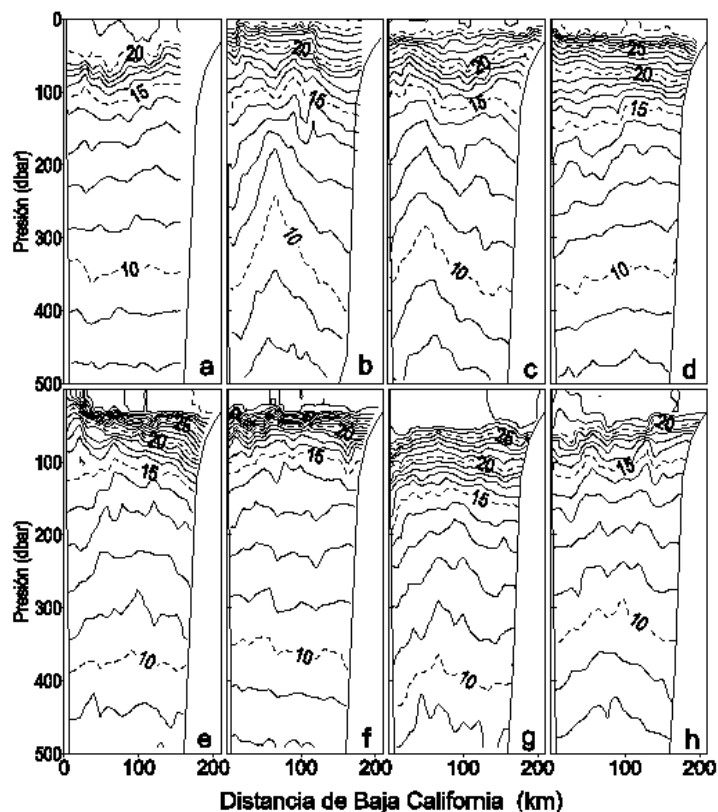


Figura 3. Secciones de temperatura (°C). El intervalo de contornos es de 1°C. (a) 8–9 de febrero de 1994, (b) 2–5 de mayo de 1992, (c) 28–30 de mayo de 1998, (d) 2–4 de agosto de 1998, (e) 13–15 de agosto de 1995, (f) 31 de octubre a 1 de noviembre de 1994, (g) 19–20 de noviembre de 1997 y (h) 29–31 de diciembre de 1992.

Figure 3. Temperature sections (°C). The contour interval is 1°C. (a) 8–9 February 1994, (b) 2–5 May 1992, (c) 28–30 May 1998, (d) 2–4 August 1998, (e) 13–15 August 1995, (f) 31 October to 1 November 1994, (g) 19–20 November 1997 and (h) 29–31 December 1992.

Otros dos rasgos destacan de las secciones de temperatura. En noviembre de 1997 (fig. 3g) el calentamiento asociado con El Niño 1997–1998 resultó en un hundimiento de alrededor de 50 dbar para la mayoría de las isothermas. La sección de agosto de 1995 (fig. 3e) fue cubierta días después de la tormenta tropical Flossie (Navarro-Olache *et al.*, 1997). En esta sección se observaron surgencias costeras cerca de BC. Este último resultado sugiere que

1994 (fig. 4a), May 1998 (fig. 4c), August 1995 (fig. 4e), October/November 1994 (fig. 4f) and December 1992 (fig. 4h), usually as an upper layer of 30–80 dbar thickness. GCW was more frequently seen on the western side of the gulf, although it also occurred over the Sinaloa shelf in February 1994 (fig. 4a) and May 1998 (fig. 4c). In one section, August 1995 (fig. 4e), GCW was also observed as a subsurface layer at 140 dbar next to BC.

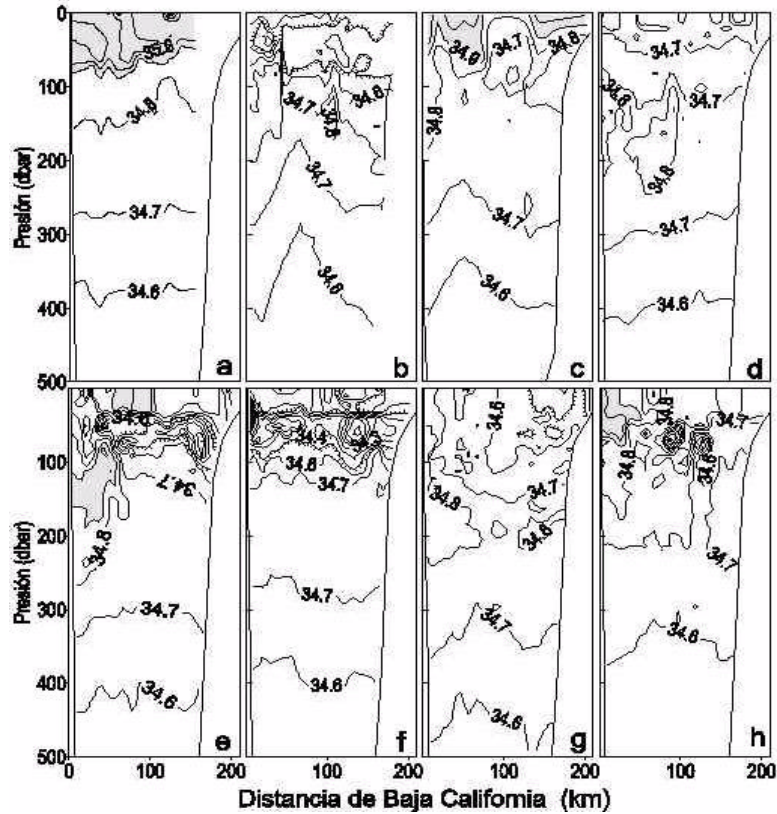


Figura 4. Secciones de salinidad. El intervalo de contornos es de 0.1. La región sombreada indica $S \geq 34.9$. La isolínea achurada es $S = 34.5$. (a) 8–9 de febrero de 1994, (b) 2–5 de mayo de 1992, (c) 28–30 de mayo de 1998, (d) 2–4 de agosto de 1998, (e) 13–15 de agosto de 1995, (f) 31 de octubre a 1 de noviembre de 1994, (g) 19–20 de noviembre de 1997 y (h) 29–31 de diciembre de 1992.

Figure 4. Salinity sections. The contour interval is 0.1. The shaded region indicates $S \geq 34.9$. The hatched isohaline is $S = 34.5$. (a) 8–9 February 1994, (b) 2–5 May 1992, (c) 28–30 May 1998, (d) 2–4 August 1998, (e) 13–15 August 1995, (f) 31 October to 1 November 1994, (g) 19–20 November 1997 and (h) 29–31 December 1992.

las surgencias costeras, comúnmente observadas en imágenes AVHRR en latitudes altas en el golfo (Soto-Mardones *et al.*, 1999), se presentan con menos frecuencia en la CP.

Como se describió anteriormente, no se observó un patrón temporal claro asociado con la distribución de salinidad (fig. 4). La frontera

The distribution of fresher waters, CCW or TSW with $S < 34.5$, was even more complex than that of GCW. In May 1992 (fig. 4b) and October/November 1994 (fig. 4f), these waters were observed as a shallow (50–70 dbar) salinity minimum across the entire gulf. In August 1995 (fig. 4e) and December 1992

inferior del complejo campo de salinidad de la capa superior fue de 34.7 (fig. 2) entre los 200 y 300 dbar (fig. 4). En febrero de 1994 (fig.4a), la salinidad se incrementó desde esta profundidad hasta 35.1 cerca de la superficie, pero en otros meses se observó un complejo patrón de máximos y mínimos de salinidad. La única generalización que es posible observar en la salinidad de la capa superior es la tendencia hacia valores mayores sobre el lado oeste del golfo. El AGC $\sigma > 34.9$, sombreada en la fig.4) se observó en febrero de 1994 (fig. 4a), mayo de 1998 (fig. 4c), agosto de 1995 (fig.4e), octubre/noviembre de 1994 (fig. 4f) y diciembre de 1992 (fig. 4h), generalmente como una capa superior de 30–80 dbar de espesor. Esta agua se observó de manera más frecuente en el lado oeste del golfo, aunque también se observó en la plataforma de Sinaloa en febrero de 1994 (fig. 4a) y mayo de 1998 (fig. 4c). En la sección de agosto de 1995 (fig.4e), el AGC fue observada cerca de BC como una capa subsuperficial a 140 dbar.

La distribución de aguas de menor salinidad, el ACC o AST con $S < 34.5$, fue aún más compleja que la distribución de AGC. En mayo de 1992 (fig. 4b) y octubre/noviembre de 1994 (fig. 4f), estas aguas fueron observadas como un mínimo de salinidad somero (50–70 dbar) a través de toda la entrada del golfo. En agosto de 1995 (fig. 4e) y diciembre de 1992 (fig. 4h), estas aguas aparecen aproximadamente a la misma presión pero como núcleos angostos sobre el lado de Sinaloa. Las secciones con aguas de $S < 34.2$ en agosto de 1995 (fig. 4e), octubre/noviembre de 1994 (fig. 4f) y diciembre de 1992 (fig. 4h) también incluyeron AGC.

Asociada con ASsSt, se observó sobre algunas secciones un máximo de salinidad subsuperficial de ~ 34.8 , aproximadamente a los 200 dbar. Aguas con estas características fueron observadas en mayo de 1998 (fig. 4b), agosto de 1998 (fig. 4d) y diciembre de 1992

(fig.4h), these waters appear at about the same pressure but as narrow cores on the Sinaloa side of the gulf. Sections with waters of $S < 34.2$ in August 1995 (fig. 4e), October/November 1994 (fig. 4f) and December 1992 (fig. 4f) also included GCW.

Subsurface salinity maxima, ~ 34.8 , associated with StSsW were observed at about 200 dbar on some sections. In May 1998 (fig.4b), August 1998 (fig. 4d) and December 1992 (fig. 4h) these waters were observed next to BC, as well as near the center of the gulf. This layer was best developed during El Niño conditions (November 1997, fig. 4g), spanning almost the entire gulf, although it was thicker on the western side of the gulf.

The mean fields, $\langle \theta_{xp} \rangle$ and $\langle S_{xp} \rangle$, are shown in figure 5. In the upper 20 dbar, the warmest surface temperatures, 26°C, occurred at the eastern boundary next to the Sinaloa shelf, while the coolest temperature, 25°C, was located at the western boundary, next to BC (fig. 5a). Between 20 and 100 dbar, isotherms were level and the vertical temperature gradient was about 1°C per 10 dbar. Below 100 dbar, the vertical temperature gradient decreased and the isotherms were displaced upward over the central basins. This means that on a given pressure surface, colder temperatures were found at a distance of about 60 km from BC, with warmer temperatures observed next to the shelf and slope of both BC and Sinaloa. The 11°C and 12°C isotherms had the largest vertical displacements, about 50 dbar. At 500 dbar, $\langle \hat{\theta}_{xp} \rangle$ was about 8°C.

The section of mean salinity (fig. 5b) indicated a salinity maximum, >34.7 , at about 200 dbar across the entire section. Below this level, salinity decreased to about 34.5 at 500 dbar, and the isohalines (34.6, 34.7) were deepest next to BC and, similar to the isotherms, were displaced upward over the central portion of the basin. Two cores of $S > 34.8$

(fig. 4h) cerca de BC, así como cerca del centro del golfo. Esta capa fue mejor desarrollada durante las condiciones de El Niño (noviembre de 1997; fig. 4g), a través de casi toda la entrada al golfo, aunque ésta fue más gruesa sobre el lado oeste del golfo.

Los campos medios, $\langle \theta_{xp} \rangle$ y $\langle S_{xp} \rangle$, se muestran en la figura 5. En la capa superior de 20 dbar, las temperaturas superficiales más altas (26°C) se localizaron en la frontera este cerca de la plataforma de Sinaloa, mientras que las temperaturas más bajas (25°C) se localizaron sobre la frontera oeste, cerca de BC (fig.5a). Entre los 20 y 100 dbar, la pendiente de las isotermas es cercana a cero y el gradiente vertical de temperatura fue de aproximadamente 1°C por cada 10 dbar. Por debajo de los 100 dbar, el gradiente vertical de temperatura disminuyó y las isotermas se observan desplazadas hacia arriba sobre la parte central de la cuenca. Esto significa que sobre una superficie de presión dada, las temperaturas menores se observaron a una distancia de aproximadamente 60 km de BC, con temperaturas mayores cerca de la plataforma y del talud continental de BC y Sinaloa. Las isotermas de 11°C y 12°C fueron las que mostraron el mayor desplazamiento vertical, cerca de 50 dbar. A los 500dbar, $\langle \theta_{xp} \rangle$ fue aproximadamente 8°C.

La sección de salinidad media (fig. 5b) mostró un máximo de salinidad, >34.7 , a ~200dbar a lo largo de toda la sección. Debajo de este nivel, la salinidad disminuyó aproximadamente a 34.5 a los 500 dbar, y las isohalinas (34.6, 34.7) fueron más profundas cerca de BC. Similar a las isotermas, éstas fueron desplazadas hacia arriba sobre la porción central de la cuenca. Cerca de BC se encontraron dos núcleos de salinidad de $S > 34.8$: uno en la superficie donde el intervalo de temperatura media fue de 22°C a 25°C, y el segundo a los 125 dbar, con un intervalo de temperatura media de 14°C a 16°C. Alrededor de los

were found next to BC: one was at the surface, where mean temperatures ranged from 22°C to 25°C, and the second was at 125 dbar, where mean temperatures ranged from 14°C to 16°C. At about 60 dbar, an intrusion of $S < 34.7$ appeared next to the Sinaloa shelf and nearly extended across the entire section. This intrusion was thickest on the Sinaloa side of PB, where several cores of $S < 34.5$ occurred. The inclusion of the November 1997 data did not alter the appearance of figure 5.

The standard deviations, σ_{θ} , σ_S and $\sigma_{\gamma_{\theta}}$, are shown in figure 6. The standard deviations were computed both without (fig. 6a, b, c) and with (fig. 6d, e, f) the November 1997 El Niño data. In both cases, the largest variability was near the surface, of 3.5°C, 0.2 and 0.8 to 1.0 kg m⁻³ for temperature, salinity and density anomaly, respectively. The variability decreased rapidly with depth so that standard deviations of 0.5°C, 0.05 and 0.1 kg m⁻³ were restricted to the 150 dbar upper layer. In the upper 100 dbar, there were no noticeable spatial patterns but below this level, the largest variability occurred along the BC slope and at a distance of about 60 km from BC, the latter resulting from doming of the property fields. Inclusion of the November 1997 cruise resulted in the deepening of the 1.0°C and 0.2 kg m⁻³ isopleths by 40 dbars (fig. 6 a, c), but had little effect on σ_S (fig. 6e).

Temperature and salinity anomalies, θ' and S' , for each cruise were calculated and are shown in figures 7 and 8, respectively. In the upper 50 dbar, the temperature anomaly field was negative for the winter and spring cruises (fig. 7a, b, c, h) and positive for the summer and fall cruises (fig. 7d, e, f, g), due to the effects of seasonal warming. Below 50 dbar, the pattern of temperature anomalies was more complex. Largest temperature anomalies were associated with the November 1997 El Niño conditions (fig. 7g). In marked

60dbar, se observó una intrusión de $S < 34.7$ cerca de la plataforma de Sinaloa, la cual se extendió a casi toda la sección. Esta intrusión fue más gruesa del lado de Sinaloa que sobre la CP, donde se observaron varios núcleos de $S < 34.5$. La inclusión de los datos del crucero de noviembre de 1997 no alteran la apariencia de la figura 5.

Las desviaciones estándar, σ_{θ} , σ_S y σ_{ρ} , se muestran en la figura 6. Las desviaciones estándar se calcularon sin (fig. 6a, b, c) y con (fig. 6d, e, f) los datos de El Niño de noviembre de 1997. En ambos casos, la mayor variabilidad se presentó cerca de la superficie, de 3.5°C, 0.2 y 0.8 a 1.0 kg m⁻³ para temperatura, salinidad y anomalía de densidad, respectivamente. La variabilidad disminuye rápidamente con la profundidad, tal que las desviaciones estándar de 0.5°C, 0.05 y 0.1 kg m⁻³ para temperatura, salinidad y anomalía de densidad, respectivamente, estuvieron restringidas a la capa superior de los 150 dbar. En la capa superior de 100 dbar, no se observó un patrón espacial muy claro. Sin embargo, y como resultado de la curvatura de los campos de propiedades, debajo de este nivel se observó que la mayor variabilidad se localizó sobre el talud continental de BC, a una distancia de 60 km de BC. La inclusión del crucero de noviembre de 1997 resultó en el hundimiento de 40 dbar de las isopletras de 1.0°C y 0.2kg m⁻³ (fig. 6a, c), y tuvo un mínimo efecto sobre σ_S (fig. 6e).

Las anomalías de temperatura y salinidad, $\hat{\theta}'$ y \hat{S}' calculadas para cada crucero se muestran en las figuras 7 y 8, respectivamente. Debido a los efectos del calentamiento estacional sobre la capa superficial de 50 dbar, las anomalías de temperatura fueron negativas para los cruceros de invierno y primavera (fig. 7a, b, c, h) y positivas para los cruceros de verano y otoño (fig. 7d, e, f, g). Debajo de los 50 dbar, el patrón de las anomalías de

contrast to December 1992 (fig. 7h) and October/November 1994 (fig. 7f), the warming in November 1997 extended throughout the water column, with the largest anomalies in the upper portion of the seasonal thermocline, exceeding 6°C next to BC.

It is difficult to make generalizations regarding the seasonal pattern of salinity anomalies. In the upper 200 dbar, positive salinity anomalies over most of the section were associated with winter cruises (fig. 8a, h) and negative salinity anomalies with fall cruises (fig. 8f, g). The negative salinity anomalies observed for the November 1997 El Niño conditions were -0.1 to -0.2, compared to larger negative anomalies, -0.3, observed in October/November 1994. During other months (fig. 8b, c, d, e), the pattern of salinity anomalies was more complex.

DISCUSSION

The doming of the isotherms (and isopycnals, not shown) was associated with the geostrophic equilibrium of the field of mass and the flow (Collins *et al.*, 1997). Therefore, ocean currents were directed into the gulf along Sinaloa and out of the gulf along BC. The doming was evident in the mean field, but was strongest in May, and also occurred in November 1997 and December 1992. During these periods, May (November) is when maximum input (output) of heat from the Pacific to the gulf occurs, 21×10^{12} W (59×10^{12} W) (Castro *et al.*, 1994). This suggests that exchange of waters between the gulf and the Pacific occurs via cyclonic circulation.

There have been several references to a cyclonic flow pattern at the entrance to the Gulf of California, but they state that cyclonic flow occurred in the summer and changed to anti-cyclonic in winter (Roden and Groves, 1959; Bray, 1988; Beier, 1997). Our data showed cyclonic circulation in spring, fall and winter

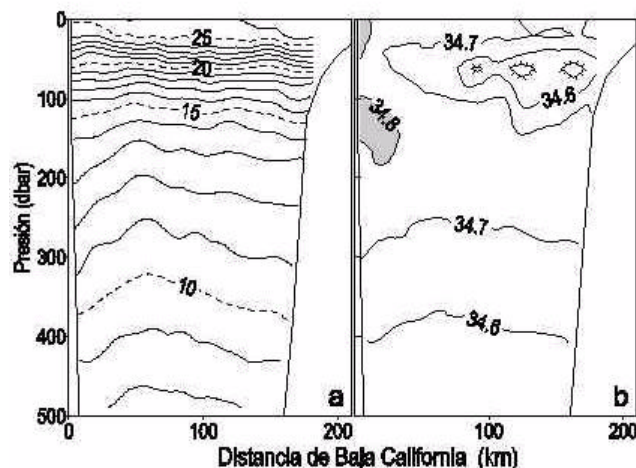


Figura 5. Promedios de (a) temperatura (el intervalo de contornos es de 1°C) y (b) salinidad (el intervalo de contornos es de 0.1). Para la salinidad, los valores de $S \geq 34.8$ están sombreados y los de $S = 34.5$ están achurados.

Figure 5. Mean (a) temperature (contour interval is 1°C) and (b) salinity (contour interval is 0.1). For salinity, $S \geq 34.8$ is shaded and $S = 34.5$ is hatched.

temperatura fue más complejo. Los valores mayores de anomalías de temperatura fueron asociados con las condiciones de El Niño de noviembre de 1997 (fig. 7g). En contraste con diciembre de 1992 (fig. 7h) y octubre/noviembre de 1994 (fig. 7f), el calentamiento en noviembre de 1997 se extendió en toda la columna de agua, con las mayores anomalías (en exceso de 6°C cerca de BC) en la parte superior de la termoclina estacional.

Es difícil hacer generalizaciones respecto al patrón estacional de las anomalías de salinidad. En la capa superior de 200 dbar, las anomalías positivas de salinidad sobre gran parte de la sección estuvieron asociadas con los cruceros de invierno (fig. 8a, h) y las anomalías negativas de salinidad con los cruceros de otoño (fig. 8f, g). Las anomalías negativas de salinidad observadas para las condiciones de El Niño en noviembre de 1997 fueron de -0.1 a -0.2 , comparadas con las anomalías negativas más altas, -0.3 , observadas en octubre/noviembre

(May, November and December). Anticyclonic flow was not observed.

The asymmetry of the salinity and temperature fields across the entrance to the gulf should reflect conditions needed for salt and temperature balances. The salinity distribution in the upper 200 dbar indicated that waters entering the gulf were different from those that leave the gulf. The freshest waters enter the gulf below the surface at a pressure of about 70 dbars along the Sinaloa shelf. They have characteristics of both CCW and TSW, the latter warmer than the former. Some of these fresh waters recirculate and leave the gulf, as evidenced by the fact that the fresh water lens extended to the west of the temperature minimum associated with the doming isopycnals. These waters are about 0.1 saltier than those that enter the gulf immediately to the east.

Two saline water masses, one warmer than the other, were observed leaving the gulf at the coast of BC. The warm, saline, surface water

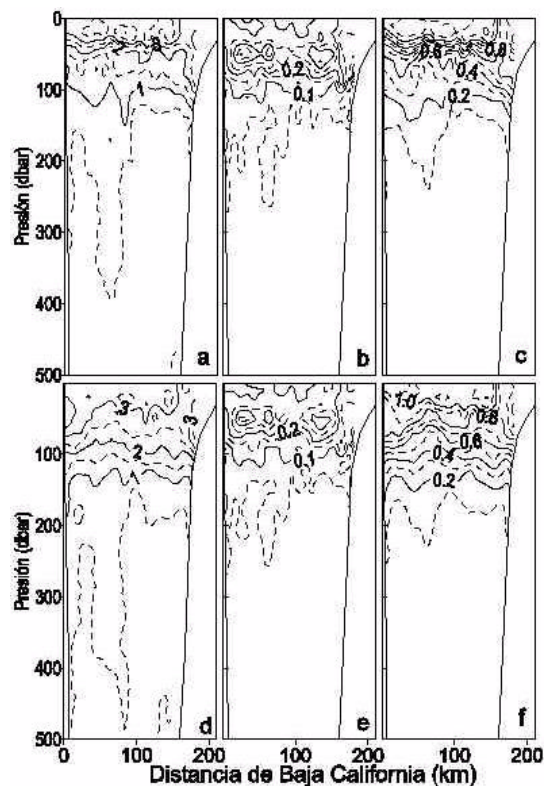


Figura 6. Desviación estándar de temperatura (a, d), salinidad (b, e) y anomalía de densidad (c, f). Los gráficos (a), (b) y (c) no incluyen los datos del crucero de noviembre de 1997, mientras que los gráficos (d), (e) y (f) sí los incluyen. El intervalo de contornos es de 1, 0.1 y 0.1, respectivamente.

Figure 6. Standard deviation of temperature (a, d), salinity (b, e) and density anomaly (c, f). Panels (a), (b) and (c) do not include the November 1997 cruise, whereas (d), (e) and (f) do. The contour interval is 1, 0.1 and 0.1, respectively.

de 1994. Durante otros meses (fig. 8b, c, d, e), el patrón de anomalías de salinidad fue más complejo.

DISCUSIÓN

La curvatura (domo) de las isotermas (e isopicnas, no mostradas) estuvo asociado con el equilibrio geostrófico del campo de masa y el flujo (Collins *et al.*, 1997). Por lo tanto, las

was GCW. This water mass has been observed at the entrance to the gulf by a number of researchers (Roden, 1964; Torres-Orozco, 1993; Alvarado-Graef, 1998). The colder (15°C) and high salinity (34.83) subsurface water has not been previously observed at the entrance to the gulf. This subsurface water has similar θ/S ranges to StSsW and Bray (1988) correctly identifies waters of these characteristics as originating within the gulf,

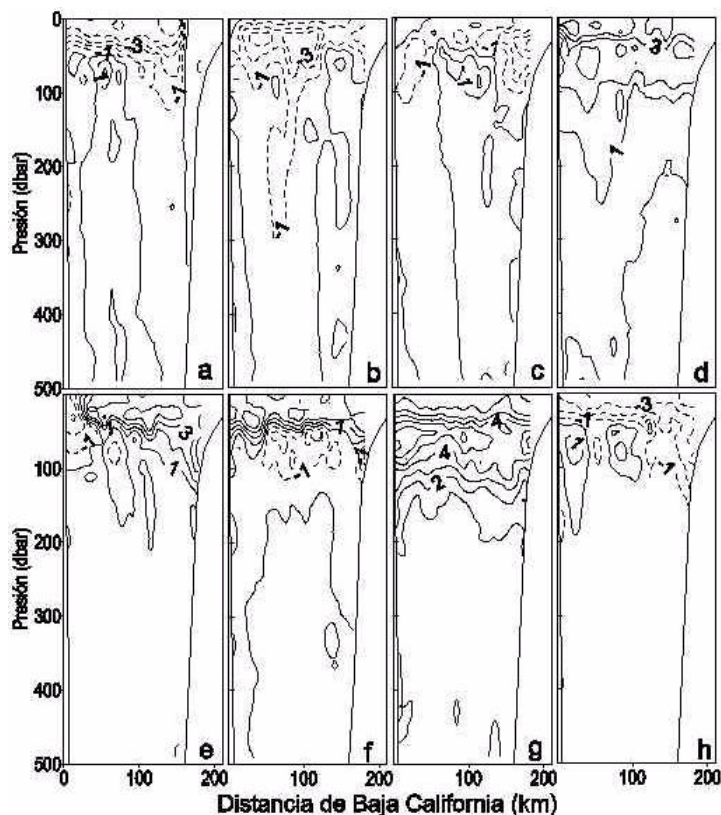


Figura 7. Secciones de anomalías de temperatura. El intervalo de contornos es de 1°C. Las líneas quebradas indican valores negativos. (a) 8–9 de febrero de 1994, (b) 2–5 de mayo de 1992, (c) 28–30 de mayo de 1998, (d) 2–4 de agosto de 1998, (e) 13–15 de agosto de 1995, (f) 31 de octubre a 1 de noviembre de 1994, (g) 19–20 de noviembre de 1997 y (h) 29–31 de diciembre de 1992.

Figure 7. Temperature anomaly sections. The contour interval is 1°C. Dashed lines indicate negative values. (a) 8–9 February 1994, (b) 2–5 May 1992, (c) 28–30 May 1998, (d) 2–4 August 1998, (e) 13–15 August 1995, (f) 31 October to 1 November 1994, (g) 19–20 November 1997 and (h) 29–31 December 1992.

corrientes oceánicas fluyen hacia dentro del golfo a lo largo de Sinaloa y hacia fuera del golfo a lo largo de BC. El domo fue evidente en el campo medio, pero fue más fuerte en mayo y ocurrió también en noviembre de 1997 y diciembre de 1992. En estos periodos, mayo (noviembre), es cuando hay la máxima entrada (salida) de calor del Pacífico al golfo 21×10^{12} W (59×10^{12} W) (Castro *et al.*, 1994).

referring to them as Central Gulf Water (CGW). Therefore, within PB, $S = 34.8$ rather than $S = 35$ would be a better boundary between waters formed in the gulf and the Pacific. Roden (1964) and Torres-Orozco (1993) have shown surface waters with these temperatures but higher salinity (35.2) in the region between the northern and central gulf in winter, suggesting that both tidal mixing and

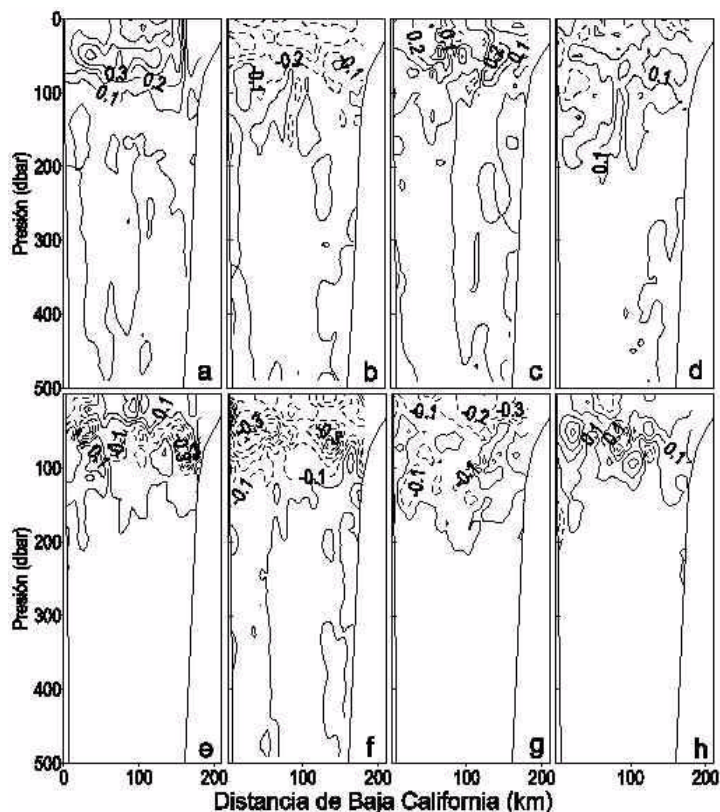


Figura 8. Secciones de anomalías de salinidad. El intervalo de contornos es de 0.1. Las líneas quebradas indican valores negativos. (a) 8–9 de febrero de 1994, (b) 2–5 de mayo de 1992, (c) 28–30 de mayo de 1998, (d) 2–4 de agosto de 1998, (e) 13–15 de agosto de 1995, (f) 31 de octubre a 1 de noviembre de 1994, (g) 19–20 de noviembre de 1997 y (h) 29–31 de diciembre de 1992.

Figure 8. Salinity anomaly sections. The contour interval is 0.1. Dashed lines indicate negative values. (a) 8–9 February 1994, (b) 2–5 May 1992, (c) 28–30 May 1998, (d) 2–4 August 1998, (e) 13–15 August 1995, (f) 31 October to 1 November 1994, (g) 19–20 November 1997 and (h) 29–31 December 1992.

Esto sugiere que el intercambio de aguas entre el golfo y el Pacífico se da vía circulación ciclónica.

Existen varios trabajos que hacen referencia a un patrón de flujo ciclónico en la entrada del Golfo de California, pero éstos establecen que el flujo ciclónico ocurre en verano y cambia a anticiclónico en invierno (Roden y Groves, 1959; Bray, 1988; Beier, 1997). Nuestros datos mostraron una circulación

atmospheric cooling could contribute to the formation of these waters. Given cyclonic circulation at the entrance, and with both warm and cold water masses on either side, it is possible to postulate a three-dimensional circulation in the upper 200 m to explain the seasonal variability of the heat exchange between the Gulf of California and Pacific Ocean observed by Castro *et al.* (1994). The May (November) inflow (outflow) of heat could be

ciclónica en primavera, otoño e invierno (mayo, noviembre y diciembre). El flujo anticiclónico no se observó.

La asimetría de los campos de salinidad y temperatura a través de la entrada del golfo reflejan las condiciones necesarias que se requieren para los balances de sal y calor en el golfo. La distribución de salinidad en la capa superficial de 200 dbar indicó que las aguas que entran al golfo son diferentes a las que salen. Las aguas de menor salinidad entran al golfo debajo de la superficie a una presión de aproximadamente 70 dbar sobre la plataforma de Sinaloa. Estas aguas tienen características tanto de ACC como de AST, esta última de mayor temperatura que la primera. Parte de esas aguas de baja salinidad son recirculadas y abandonan el golfo, como muestra el hecho de que las lenguas de agua de menor salinidad se extienden hacia el oeste del mínimo de temperatura asociado con el domo de las isopícnas. Estas aguas son aproximadamente 0.1 más salinas que las que penetran al golfo inmediatamente al este.

Saliendo del golfo por la costa de BC, se observaron dos masas de agua de alta salinidad, una de mayor temperatura que la otra. El agua superficial caliente y salina fue el AGC. Esta masa de agua ha sido observada en la entrada del golfo por varios investigadores (Roden, 1964; Torres-Orozco, 1993; Alvarado-Graef, 1998). El agua subsuperficial de menor temperatura (15°C) y alta salinidad (34.83) no ha sido mencionada previamente en la entrada del golfo. Esta agua subsuperficial tiene intervalos similares de θ/S con el ASsSt. Bray (1988) identificó aguas de estas características que se originan dentro del golfo y hace referencia a ésta como Agua Central del Golfo (ACG). Por lo tanto, dentro de la CP, $S = 34.8$ en vez de $S = 35$ podría ser una mejor frontera entre las aguas formadas en el golfo y en el Pacífico. Roden (1964) y Torres-Orozco (1993) encontraron en invierno aguas superficiales con estas

acomplished by inflow of TSW (CCW) and outflow of GCW (CGW) (fig. 9). The August 1995 and October/November 1994 sections indicated the presence of both CCW and GCW, the latter with temperatures exceeding 27°C. Both May sections showed the presence of TSW and CGW. The August 1995 section also showed both TSW and CGW and this could be explained by a one-month delay in the seasonal cycle.

The fact that at the entrance to the gulf, others have observed CCW in spring and TSW in other seasons (Wyrski, 1966; Griffiths, 1968; Álvarez-Sánchez *et al.*, 1978) would argue against the circulation scheme proposed in figure 9. However, many of these earlier surveys do not resolve smaller-scale features seen in figure 4, e.g., the small-scale (10 dbar by 10 km) salinity anomalies. To investigate the proposed circulation (fig. 9), models that conserve salt (and estimate heat transports) are under development and results will be reported when completed.

The November 1997 cruise coincided with a period when El Niño conditions were strongly affecting waters along the west coast of North America (Lynn *et al.*, 1998; Asanuma *et al.*, 1999). The 20°C isotherm was observed at its deepest level, about 100 dbar, and large (>4°C) temperature anomalies were observed between 40 and 120 dbar across the entire section (fig. 7g). These features are consistent with a 50 dbar depression of the thermocline. This type of anomaly could be created by poleward propagation of warming observed in the eastern equatorial Pacific along the eastern boundary of North America as internal Kelvin waves.

As with the seasonal cycle, the salinity changes associated with the 1997 El Niño were less dramatic than those due to temperature. Salinities in the upper 200 dbar in November 1997 were about -0.1 to -0.2 lower than the mean. While this freshening was consistent with that observed during previous El Niños

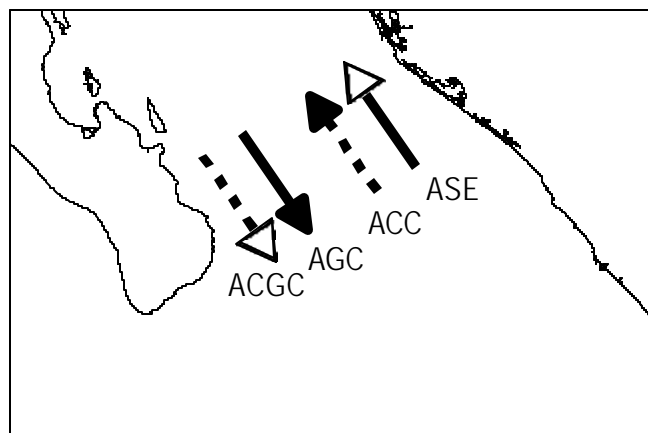


Figura 9. Diagrama esquemático de la circulación tridimensional de los 200 m superiores en la Cuenca Pescadero. Las líneas quebradas denotan flujos subsuperficiales. Las flechas vacías y rellenas indican intercambio durante mayo y noviembre, respectivamente.

Figure 9. Schematic diagram of the upper 200-m three-dimensional circulation in Pescadero Basin. Broken lines denote subsurface flows. Open and solid arrowheads indicate exchange during May and November, respectively.

temperaturas pero de salinidad mayor (35.2) en la región entre la parte central y norte del golfo, lo que sugiere que tanto mezcla por marea y enfriamiento atmosférico pueden contribuir a la formación de estas aguas.

Dada la circulación ciclónica en la entrada del golfo y dada la presencia de masas de agua caliente y fría sobre cada lado de la entrada, es posible postular una circulación tridimensional en la capa superior de 200 m para explicar la variabilidad estacional del intercambio de calor entre el Golfo de California y el Océano Pacífico observado por Castro *et al.* (1994). La entrada (salida) de calor en mayo (noviembre) se logra por la entrada de AST (ACC) y salida de AGC (ACG) (fig. 9). Las secciones de agosto de 1995 y octubre/noviembre de 1994 indican la presencia tanto de ACC como de AGC, esta última con temperaturas mayores de 27°C. Ambas secciones de mayo muestran la presencia de AST y ACG. La sección de agosto de 1998 también mostró AST y ACG, lo cual

(Lavín *et al.*, 1997), it was less than the freshening observed in October/November 1994 (fig. 8f). Resolution of both the seasonal and interannual variability of salinity in PB will require additional observations.

ACKNOWLEDGEMENTS

This project was supported by CONACYT, projects 1076-T9201, 26653-T and 4271P-T9601; by UABC, projects 4009 and 4015; and by the Oceanographer of the Navy (US) and the Naval Postgraduate School. S. Larios, E. Gil and R. Blanco participated in data collection and processing. Ship support by the Secretaría de Marina and UNAM (Mexico) is acknowledged. CICESE is also thanked for partial support of ship time. We also acknowledge the important contributions of the masters and crews of the R/Vs *A. Humboldt*, *F. Ulloa* and *Point Sur*, and USNS *DeSteiguer*. The participation of students of the Facultad de

podría explicarse por el retraso de un mes en el ciclo estacional.

El hecho de que en la entrada del golfo otros estudios hayan observado ACC en primavera y AST en otras estaciones (Wyrski, 1966; Griffiths, 1968; Álvarez-Sánchez *et al.*, 1978), podría argumentar en contra del esquema de circulación propuesto en la figura 9. Sin embargo, muchas de las mediciones anteriores no resuelven estructuras de pequeña escala (10dbar por 10 km) como los observados, por ejemplo, en las anomalías de salinidad de la figura 4. Para investigar la circulación propuesta (fig. 9), se están desarrollando modelos de conservación de sal (y cálculos de transporte de calor) que serán informados en un futuro.

El crucero de noviembre de 1997 coincidió con el periodo cuando El Niño afectó fuertemente las aguas a lo largo de la costa oeste de Norte América (Lynn *et al.*, 1998; Asanuma *et al.*, 1999). En toda la sección, la profundidad máxima observada en la isoterma de 20°C fue de aproximadamente 100 dbar, con anomalías grandes (>4°C) entre los 40 y 120 dbar. Estas características son consistentes con una depresión de la termoclina de 50 dbar. Este tipo de anomalía puede ser generado por el calentamiento observado en el Pacífico Ecuatorial Oriental, señal que se propaga hacia el polo como ondas internas de Kelvin a lo largo de la frontera este de Norte América.

Con referencia al ciclo estacional, los cambios en salinidad asociados con El Niño de 1997 fueron menos drásticos que los de la temperatura. Las salinidades en la capa superior de 200 dbar en noviembre de 1997 fueron aproximadamente de 0.1 a 0.2 por debajo del promedio. Aun cuando esta disminución en salinidad es consistente con las observaciones en otros eventos de El Niño (Lavín *et al.*, 1997), es menor a la disminución observada en octubre/noviembre de 1994 (fig. 8f). La resolución adecuada de tanto la variabilidad

Ciencias Marinas of UABC during the cruises is appreciated. Suggestions and comments by S.G. Marinone, J.M. Robles and an external reviewer greatly improved the paper.

English translation by the authors.

estacional como la interanual de la salinidad en la CP requiere de más observaciones.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por CONACYT mediante los proyectos 1076-T9201, 26653-T y 4271P-T9601; por la UABC mediante los proyectos 4009 y 4015; y por la Oceanographer of the Navy (Estados Unidos) y la Naval Postgraduate School. S. Larios, E. Gil y R. Blanco participaron en la recolección y procesamiento de datos. Se agradece el tiempo de barco provisto por la Secretaría de Marina y por la UNAM (México). El CICESE proporcionó financiamiento parcial del tiempo de barco. Agradecemos también las contribuciones importantes de la tripulación y oficiales de los B/Os *A. Humboldt*, *F. de Ulloa* y *Point Sur*, y USNS *DeSteiguer*. Se agradece la participación de los estudiantes de la Facultad de Ciencias Marinas en los cruceros. Las sugerencias y comentarios de S.G. Marinone, J.M. Robles y un revisor externo mejoraron apreciablemente este artículo.

REFERENCIAS

- Alvarado-Graef, P. (1998). Estructura térmica y circulación costera frente a Baja California Sur, en el Pacífico y Golfo de California. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, México, 75 pp.
- Álvarez-Sánchez, L.G., Stevenson, M.R. y Wyatt, B. (1978). Circulación y masas de agua en la región

- de la boca del Golfo de California en la primavera de 1970. *Ciencias Marinas*, 5(1): 57–69.
- Asanuma, H., Rago, T.A., Collins, C., Chávez, F. and Castro, C. (1999). Hydrography of Central California Waters during the 1997–8 El Niño. Tech. Rep. NPS-OC-99-01, Naval Postgraduate School, Monterey, California, 121 pp.
- Beier, E. (1997). A numerical investigation of the annual variability in the Gulf of California. *J. Phys. Oceanogr.*, 27: 615–632.
- Beron-Vera, J. and Ripa, P. (2000). Three-dimensional aspects of the seasonal heat balance in the Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, 105: 11441–11457.
- Blanco, R., Larios, S., Dévora, A.S., Gil, E., Mascarenhas Jr., A.S. y Collins, C. (1995). Datos hidrográficos del crucero PESCAR 5 en la Cuenca Pescadero, octubre 26 a noviembre 2 de 1994. Rep. Técnico, Instituto de Investigaciones Oceanológicas, UABC, Ensenada, México, 61pp.
- Blanco, R., Larios, S., Gil, E., Mascarenhas Jr., A.S., Durazo, R. y Collins, C. (1996). Datos hidrográficos del crucero PESCAR 7, agosto 11–21 de 1995. Rep. Técnico, Instituto de Investigaciones Oceanológicas, UABC, Ensenada, México, 50pp.
- Bray, N.A. (1988). Water mass formation in the Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, 93: 9223–9240.
- Carter, E.F. and Robinson, A.R. (1987). Analysis models for the estimation of oceanic fields. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 4: 49–74.
- Castro, R., Lavín, M. and Ripa, P. (1994). Seasonal heat balance in the Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, 99: 3249–3261.
- Collins, C.A., Garfield, N., Mascarenhas Jr., A.S. and Spearman, M.G. (1997). Ocean current across the entrance to the Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, 102: 20927–20936.
- Douglas, M.W., Maddox, R.A., Howard, K. and Reyes, S. (1993). The Mexican monsoon. *J. Climate*, 6: 1665–1677.
- Griffiths, R.C. (1968). Physical, chemical, and biological oceanography of the entrance to the Gulf of California: Spring 1960. *US Fish Wildl. Serv. Spec. Sci. Rep. Fish.*, 573: 1–47.
- Larios, S., Blanco, R., Gil, E., Sánchez, A., Mascarenhas Jr., A. y Collins, C. (1995). Datos hidrográficos del crucero PESCAR 4, febrero 8 a 9 de 1994. Rep. Técnico, Instituto de Investigaciones Oceanológicas, UABC, Ensenada, México, 18 pp.
- Lavín, M.F., Beier, E. y Badán, A. (1997). Estructura hidrográfica y circulación del Golfo de California: Escalas estacional e interanual. *Contribuciones de la Oceanografía Física en México. Monogr. No. 3, Unión Geofísica Mexicana*, pp. 139–169.
- Lynn, R., Baumgartner, T., García, J., Collins, C.A., Hayward, T.L., Hyrenbach, K.D., Mantyla, A.W., Murphree, T., Shankle, A., Schwing, F.B., Sakuma, K.M. and Tegner, M.J. (1998). The state of the California Current, 1997–1998: Transition to El Niño conditions. *CalCOFI Rep.*, 39: 25–50.
- Navarro-Olache, L.F., Mascarenhas Jr., A.S., Durazo, R. and Collins, C.A. (1997). A note on upper ocean temperature and salinity at the entrance to the Gulf of California in August 1992. *Ciencias Marinas*, 23: 273–283.
- Rago, T.A., Mitchel, R., Navarro-Olache, L.F., Garfield, N.A. and Collins, C. (1992). Hydrographic data from the *Pegasus* in the Sea of Cortes area cruise (PESCAR-01). Tech. Rep. NPS-OC-92-009, Naval Postgraduate School, Monterey, California, 51pp.
- Ripa, P. (1997). Toward a physical explanation of the seasonal dynamics and thermodynamics of the Gulf of California. *J. Phys. Oceanogr.*, 27: 597–614.
- Robles, J.M. and Marinone, S.G. (1987). Seasonal and interannual thermohaline variability in the Guaymas Basin of the Gulf of California. *Cont. Shelf Res.*, 7: 715–733.
- Roden, G.I. (1964). Oceanographic aspects of the Gulf of California. *Marine Geology of the Gulf of California: A Symposium. Mem. Am. Assoc. Petroleum Geologists*, 3: 30–58.
- Roden, G.I. (1972). Thermohaline structure and baroclinic flow across the Gulf of California entrance and the Revillagigedo Islands region. *J. Phys. Ocean.*, 2: 177–183.
- Roden, G.I. and Groves, G.W. (1959). Recent oceanographic investigations in the Gulf of California. *J. Mar. Res.*, 18: 10–35.
- Soto-Mardones, L.A., Marinone, S.G. y Parés-Sierra, A. (1999). Variabilidad espaciotemporal de la

Castro *et al.*: Variación de temperatura y salinidad en el Golfo de California

- temperatura superficial del mar en el Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 25(1): 1–30.
- Torres-Orozco, E. (1993). Análisis volumétrico de las masas de agua en el 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 ed. panel, Paris, 138 pp.
- Wyrski, K. (1965). Surface currents of the eastern tropical ocean. *Trop. Tuna Comm. Bull.* IX(5): 63–97.
- Wyrski, K. (1966). Oceanography of the eastern equatorial Pacific Ocean. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 4: 33–68.
- Wyrski, K. (1967). Circulation and water masses in the eastern equatorial Pacific Ocean. *Int. J. Oceanol. Limnol.*, 1: 117–147.