

Oceanographic conditions over the continental shelf off Magdalena Bay (Mexico) in 2011–2012

Condiciones oceanográficas en la plataforma continental frente a bahía Magdalena (México) en 2011–2012

Oleg Zaitsev^{1*}, Armando Trasviña-Castro², Jean Linero-Cueto¹, Gilberto Gaxiola-Castro³, Jushiro Cepeda-Morales^{3, 4}

¹ Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR), Instituto Politécnico Nacional, Ave. IPN s/n, Playa El Conchalito, CP 23096 La Paz, Baja California Sur, México.

² Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Unidad La Paz, 334 Miraflores, CP 23070 La Paz, Baja California Sur, México.

³ CICESE, Departamento de Oceanografía Biológica, Carretera Ensenada-Tijuana No. 3918, Zona Playitas, CP 22860 Ensenada, Baja California, México.

⁴ Universidad Autónoma de Nayarit, Ciudad de la Cultura Amado Nervo s/n, CP 63155, Tepic, Nayarit, México.

* Corresponding author. E-mail: ozaytsev@ipn.mx

ABSTRACT. The hydrophysical results obtained during six oceanographic cruises in 2011 (February, April, July, and October) and 2012 (February and April) over a 50-station sampling grid in front of the Magdalena-Almejas lagoon system (Mexico) are presented. MODIS-Aqua sensor data (1.1 km) of sea surface temperature (SST) and chlorophyll *a*, and geostrophic current fields were analyzed during the sampling periods. In the northern part of the study area the pattern of the thermohaline structure shows subsurface intrusion of modified subarctic water, especially during February and April of both years. To the south, in July and October 2011, evident indications of subtropical subsurface water were found. The geostrophic current fields in February and April show a surface southward flow along the coast, which changes direction towards the North Pole in July and October. In spring, the satellite-derived SST showed negative anomalies of up to 4.5 °C in the coastal zone, corresponding to cold upwelled water rising to the surface from a depth of 60–70 m. Based on the results, the study area can be considered the southern boundary of the transition zone between the subarctic and subtropical waters of the northeastern Pacific Ocean, with marked seasonality.

Key words: thermohaline structure, continental shelf, Baja California, California Current, Northeast Pacific Ocean.

RESUMEN. Se presentan los resultados hidrofísicos obtenidos durante seis cruceros oceanográficos realizados durante 2011 (febrero, abril, julio y octubre) y 2012 (febrero y abril) en una red de 50 estaciones frente al complejo lagunar Magdalena-Almejas (México). Se analizaron los datos de temperatura superficial del mar (TSM) y clorofila *a* del sensor MODIS-Aqua (1.1 km) y los campos de las corrientes geostróficas durante los periodos de muestreo. Al norte de la malla de muestreo, el patrón de la estructura termohalina mostró intrusiones subsuperficiales de agua subártica modificada, especialmente durante febrero y abril de ambos años. Al sur, en julio y octubre de 2011, se encontraron indicaciones de agua subtropical subsuperficial. Los campos de las corrientes geostróficas en febrero y abril mostraron un flujo superficial hacia el sur a lo largo de la costa, el cual cambió su dirección hacia el Polo Norte en julio y octubre. En primavera, la temperatura derivada de imágenes satelitales mostró anomalías negativas de hasta 4.5 °C en la zona adyacente a la costa, lo cual corresponde a las surgencias costeras que elevan agua hacia la superficie desde los 60–70 m de profundidad. Con base en los resultados, el área de estudio se puede considerar como el límite sur de la zona de transición entre las aguas subárticas y subtropicales del océano Pacífico nororiental, con una marcada estacionalidad.

Palabras clave: estructura termohalina, plataforma continental, Baja California, corriente de California, océano Pacífico nororiental.

INTRODUCTION

Oceanographic conditions in the northeastern Pacific Ocean off Baja California (Mexico) are systematically monitored as part of the program known as Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California (IMECOCAL, Mexican Investigations of the California Current), a southern extension of the California Cooperative Fisheries Investigations (CalCOFI) program. Synthesis of the long-term data

INTRODUCCIÓN

Las condiciones oceanográficas del océano Pacífico nororiental frente a Baja California (México) se estudian sistemáticamente mediante el programa Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California (IMECOCAL), que es una extensión hacia el sur del programa California Cooperative Fisheries Investigations (CalCOFI). La síntesis de la información a largo plazo obtenida de estos programas

generated by these programs has resulted in a satisfactory description of the main characteristics of the southern region of the California Current System (CCS) and of its seasonal and interannual variability (e.g., Gómez-Valdés 1983, Lynn and Simpson 1987, Durazo and Baumgartner 2002, Durazo *et al.* 2010); however, the hydrophysical processes over the continental shelf off the Baja California Peninsula to the south of the Gulf of Ulloa have not been well documented. This coastal area, like the continental shelf off the peninsula, lies outside the IMECOCAL sampling domain. This region contains the largest bays (Magdalena and Almejas) of the Pacific coast of Mexico, known for their high primary productivity (Cervantes-Duarte *et al.* 2013). The high seasonal and interannual variability of the hydrophysical processes in this area are determined by a weakening of the dominant northwesterly winds along the coast and a moving away from the shelf of the main flow of the California Current (CC) in summer and autumn (Lynn and Simpson 1987).

Analysis of the thermohaline structure along the southernmost IMECOCAL transect lines and the few studies conducted to the south of the Gulf of Ulloa show the frequent occurrence in the upper 100 m layer of relatively cold, low-salinity water from the north associated with the CC flow (Durazo *et al.* 2005). Castro-Valdez *et al.* (2012) consider that the mean salinity distribution at 50 m depth, marked by a salinity minimum of 33.6, is associated with the nucleus of the CC and extends to the southern tip of the Baja California Peninsula. Southerly intrusions of warmer, more saline subtropical water have been observed over the continental shelf and slope in summer and autumn, possibly associated with the presence of a poleward countercurrent especially during El Niño years (Durazo and Baumgartner 2002). Durazo (2009) reported the occurrence of large-scale cyclonic circulation off the southern part of the peninsula that can transport subtropical water towards the north over the continental slope and on occasion over the shelf. Hence, both subarctic and tropical waters can be observed in the area during the year. The pattern of currents is characterized by the occurrence of mesoscale (often cyclonic) eddies (Kurczyn *et al.* 2012).

Upwelling is one of the main hydrophysical processes affecting the study area (Zaitsev *et al.* 2007). The intensity and extent of upwelling depend mainly on the characteristics of the wind field (Bakun and Nelson 1977), water column stratification, coastline orientation, and regional topography (Figueroa and Moffat 2000). Surface filaments of cold water are frequently observed throughout the CC (Strub *et al.* 1991). In upwelling zones, filaments and other similar spatial structures are associated with the topography of the continental shelf and coastline irregularities (Castelao and Barth 2006).

The hydrodynamic conditions of the CCS in 2011 developed in response to the dissipation of the 2010 La Niña event in spring and summer, and the reappearance of cold La Niña conditions in autumn and winter 2011; the transition towards

permite describir satisfactoriamente las características principales de la región sureña del Sistema de la Corriente de California (SCC) y su variabilidad estacional e interanual (e.g., Gómez-Valdés 1983, Lynn y Simpson 1987, Durazo y Baumgartner 2002, Durazo *et al.* 2010). Sin embargo, los procesos hidrofísicos sobre la plataforma continental del Pacífico frente a la península de Baja California al sur del golfo de Ulloa no están bien documentados. Esta área costera se encuentra fuera del dominio de estudio del programa IMECOCAL, que tampoco incluye la plataforma continental de la península. En esta región se encuentran localizadas las bahías más grandes de la costa mexicana en el Pacífico (Magdalena y Almejas), reconocidas por su gran productividad primaria (Cervantes-Duarte *et al.* 2013). La alta variabilidad estacional e interanual de los procesos hidrofísicos en el área se determinan por el debilitamiento de los vientos dominantes del noroeste a lo largo de la costa y un alejamiento de la plataforma del flujo principal de la corriente de California (CC) en verano y otoño (Lynn y Simpson 1987).

Los análisis de la estructura termohalina en los transectos sureños del programa IMECOCAL y los pocos estudios realizados al sur del golfo de Ulloa frecuentemente demuestran la presencia de aguas relativamente frías y poco saladas del norte en la capa superficial de 100 m de profundidad, asociadas al flujo de la CC (Durazo *et al.* 2005). Castro-Valdez *et al.* (2012) consideran que la distribución de la salinidad promedio a 50 m de profundidad, marcada por un mínimo salino de 33.6, está asociada al núcleo de la CC y se extiende hasta el extremo sur de la península de Baja California. En verano y otoño, sobre el talud y la plataforma continental, se han registrado intrusiones desde el sur de aguas cálidas y más saladas de origen subtropical, que podrían asociarse a la presencia de una contracorriente hacia el polo especialmente en los años de El Niño (Durazo y Baumgartner 2002). Durazo (2009) registró la presencia de una circulación ciclónica de gran escala frente a la parte sur de la península de Baja California que puede transportar aguas subtropicales hacia el norte sobre el talud continental y en ocasiones sobre la plataforma. Por tanto, durante el año se puede observar tanto agua subártica como subtropical en el área. El patrón de corrientes se caracteriza por la aparición recurrente de remolinos de mesoescala, a menudo ciclónicos (Kurczyn *et al.* 2012).

Uno de los principales procesos hidrofísicos que afecta la zona de estudio es la surgencia costera (Zaitsev *et al.* 2007). La intensidad y extensión espacial de las surgencias dependen principalmente de las características del campo de viento (Bakun y Nelson 1977), la estratificación de la columna del agua, la orientación de la línea de costa y la topografía regional (Figueroa y Moffat 2000). Frecuentemente se observan filamentos superficiales de agua fría a lo largo de la CC (Strub *et al.* 1991). En las zonas de surgencia, los filamentos y otras estructuras espaciales similares se relacionan con la topografía de la plataforma continental y con irregularidades en la línea de costa (Castelao y Barth 2006).

neutral conditions occurred in spring 2012, as indicated by the Multivariate ENSO Index (MEI) and Pacific Decadal Oscillation (PDO) that show average climatological values for that period. The hydrophysical conditions, including coastal upwelling activity in the southern region of the CCS, show a relatively slight response to atmospheric effects relative to the climatological averages (Bjorkstedt *et al.* 2011, 2012).

This paper aims to analyze the oceanographic conditions over the continental shelf and slope off the Magdalena-Almejas Bay (MAB) lagoon system on the west coast of the Baja California Peninsula during 2011–2012, to define whether the subarctic water transported by the CC from the north and the subtropical water from the south can reach (in predominant form) these latitudes ($>24^{\circ}\text{N}$), and to evaluate coastal upwelling intensity and patterns.

MATERIALS AND METHODS

Six oceanographic cruises were conducted on board CICESE's R/V *Francisco de Ulloa* off the MAB lagoon system (fig. 1) during 9–13 February 2011 (hereinafter Feb11), 13–16 April 2011 (Apr11), 4–8 July 2011 (Jul11), 25–29 October 2011 (Oct11), 16–18 February 2012 (Feb12), and 18–21 April 2012 (Apr12). The surveys were performed over a predetermined grid of 68 stations separated by a distance of ~ 5 nautical miles (fig. 1c). Maximum depth at the stations farthest from the coast exceeded 1000 m. At each station, a conductivity, temperature, and pressure sensor (SeaBird SBE-9 CTD) was lowered to the bottom or to 500 m when the depth was greater. The water mass classification used for the temperature and salinity analyses is shown in table 1 (Durazo and Baumgartner 2002).

To complement the spatial and temporal information, we analyzed multi-platform wind data (10 m above the surface) reported by NOAA's National Climatic Data Center (www.ncdc.noaa.gov/oa/rsad/air-sea/seawinds.html) and the Coastal Upwelling Index (CUI) provided by the Pacific Fisheries Environmental Laboratory (www.pfel.noaa.gov). We also analyzed MODIS-Aqua sea surface temperature and chlorophyll *a* data (1.1 km resolution) for 2011 and 2012 (<http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/MODISA/>), and used geostrophic current fields corresponding to a period of 10 days during each cruise, with 500 db as a reference level. The latter were calculated using sea level anomaly data from NOAA's Atlantic Ocean Marine Laboratory website (www.aoml.noaa.gov/phod/dataphod/work/trinanes/INTERFACE) that displays TOPEX, ERS-2, and GFO altimeter data (spatial resolution of 0.2°) and climatological mean dynamic heights estimated based on Levitus climatology for 1000 db.

RESULTS

Wind conditions in the region during the surveys are shown in figure 2. A comparison of the Feb11 and Feb12 and

El desarrollo del estado hidrodinámico del SCC en 2011 inició con una respuesta a la disipación de La Niña 2010 durante primavera y verano, luego ocurrió un resurgimiento de condiciones frías de La Niña durante otoño e invierno en 2011 y finalmente hubo una transición a condiciones neutrales durante la primavera de 2012, como lo indican el Índice Multivariado de ENSO (MEI, por sus siglas en inglés) y la Oscilación Decenal del Pacífico (PDO), cuyos valores fueron cercanos a los valores climatológicos promedio en esta época. Las condiciones hidrofísicas, incluyendo la actividad de las surgencias costeras en la región sur del SCC, mostraron una respuesta relativamente leve a los efectos atmosféricos en relación con los promedios climatológicos (Bjorkstedt *et al.* 2011, 2012).

Los objetivos de este trabajo son analizar las condiciones oceanográficas sobre la plataforma y el talud continental frente al complejo lagunar de bahía Magdalena-Almejas (BMA) en la costa occidental de Baja California durante 2011–2012, definir si el agua subártica transportada por la CC (desde el norte) y el agua subtropical (desde el sur) pueden alcanzar en forma predominante estas latitudes ($>24^{\circ}\text{N}$), y evaluar la intensidad y patrones de las surgencias costeras.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se llevaron a cabo seis cruceros oceanográficos a bordo del B/O *Francisco de Ulloa* del CICESE frente al complejo lagunar BMA (fig. 1) durante los periodos 9–13 de febrero de 2011 (en lo sucesivo Feb11), 13–16 de abril de 2011 (Abr11), 4–8 de julio de 2011 (Jul11), 25–29 de octubre de 2011 (Oct11), 16–18 de febrero de 2012 (Feb12) y 18–21 de abril de 2012 (Abr12). Los muestreos se planearon para recorrer una red predeterminada de 68 estaciones separadas por una distancia de ~ 5 millas náuticas (fig. 1c). La profundidad máxima de las estaciones más alejadas de la costa excedió los 1000 m. En cada estación, se realizaron lances con una sonda de conductividad, temperatura y presión (CTD, modelo SBE-9 de SeaBird) hasta el fondo o hasta 500 m cuando la profundidad fue mayor. La clasificación de las masas de agua utilizada en el análisis de temperatura y salinidad se muestra en la tabla 1 (Durazo y Baumgartner 2002).

Para completar la información espacial y temporal, se estudiaron los datos de viento multiplataforma (a 10 m sobre la superficie) documentados por el National Climatic Data Center de la NOAA (www.ncdc.noaa.gov/oa/rsad/air-sea/seawinds.html) y el índice de surgencia costera (ISC) obtenido del Pacific Fisheries Environmental Laboratory (www.pfel.noaa.gov). También se analizaron datos de temperatura superficial del mar y clorofila *a* del sensor MODIS-Aqua (resolución de 1.1 km) para 2011 y 2012 (<http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/MODISA/>). Se usaron los campos de las corrientes geostroficas correspondientes a un periodo de 10 días durante cada crucero, con un nivel de referencia de 500 db. Estas corrientes se calcularon a partir de los datos de anomalías del nivel del mar de la página del Atlantic Ocean

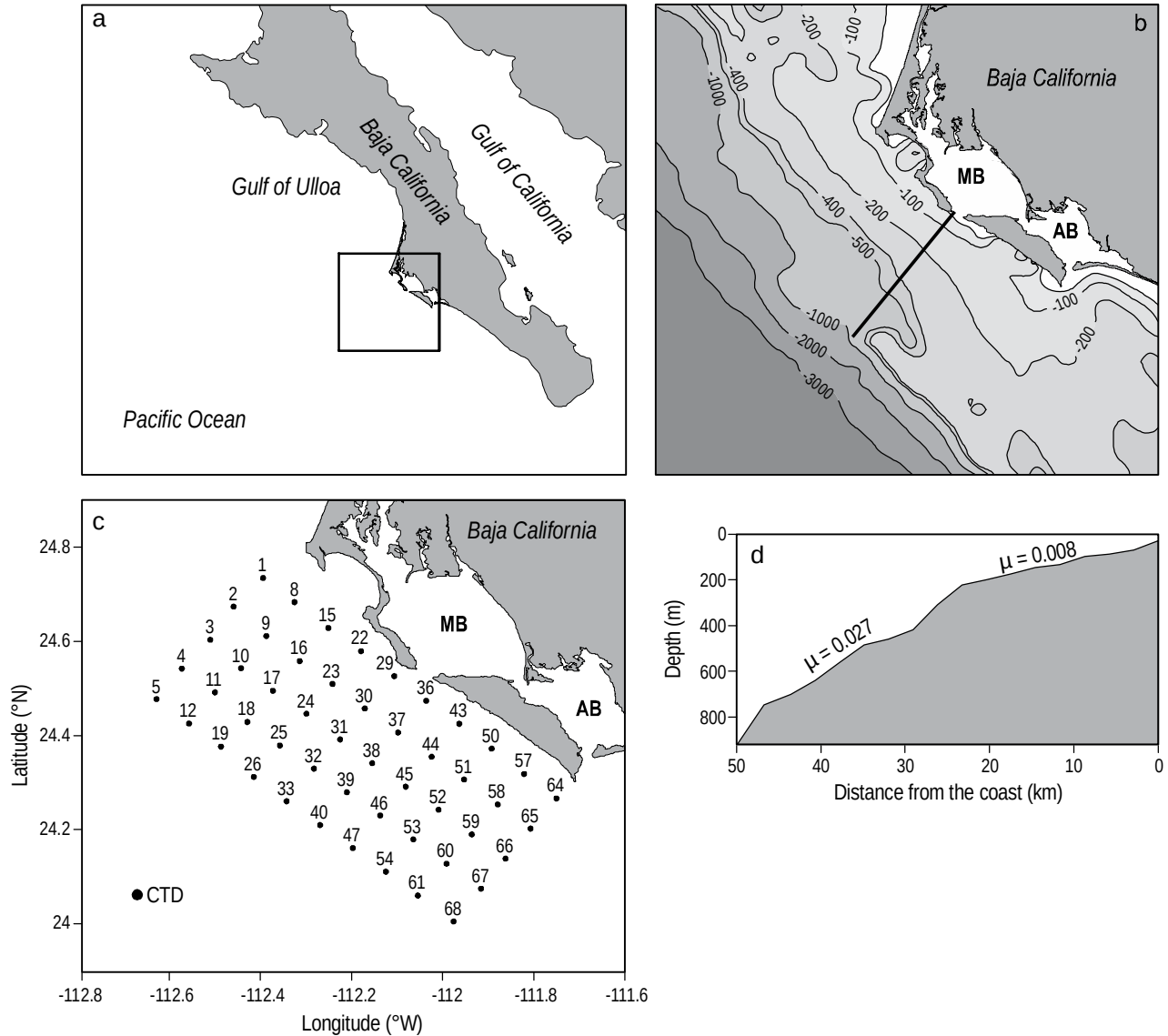


Figure 1. (a) Map of the region (Mexico), (b) bottom topography, (c) hydrographic and hydrochemical sampling grid, and (d) bottom slope (μ) over a transect marked in (b). The square in (a) indicates the study area off Magdalena Bay (MB) and Almejas Bay (AB).

Figura 1. (a) Mapa de la región (México), (b) topografía del fondo, (c) malla de muestreos hidrográficos e hidroquímicos y (d) pendiente (μ) del fondo a lo largo de un transecto marcado en (b). El cuadro en (a) indica la zona de estudio frente a bahía Magdalena (MB) y bahía Almejas (AB).

the Apr11 and Apr12 mean monthly wind fields revealed no major differences in either magnitude or direction, so only the 2011 fields are shown (fig. 2a, b). In February, wind magnitudes were lower than in April and the prevailing wind direction was from the north-northwest (fig. 2c). In April, the prevailing wind direction was from the northwest and tended to be parallel to the coast, thus favoring coastal upwelling (fig. 2d).

Figure 2c–h shows the daily mean wind time series in the center of the sampling grid (square in fig. 2a, b) and the CUI time series at latitude 24° N. Though this area is located more than 80 km from the coast, certain coherence is observed

Marine Laboratory de la NOAA (www.aoml.noaa.gov/phod/dataphod/work/trinanes/INTERFACE), que integra información de los altímetros satelitales TOPEX, ERS-2 y GFO (resolución espacial de 0.2°) y de alturas dinámicas medias climatológicas calculadas con base en la climatología de Levitus para 1000 db.

RESULTADOS

Las condiciones del viento en la región durante los periodos de estudio se muestran en la figura 2. Al comparar Feb11 con Feb12 y Abr11 con Abr12, se observó que los

Table 1. Classification of water masses (taken from Durazo and Baumgartner 2002).**Tabla 1.** Clasificación de masas de agua (tomada de Durazo y Baumgartner 2002).

Water mass	Temperature (°C)	Salinity
Subarctic Water (SAW)	8–21	33.0–34.0
Subtropical Surface Water (SSW)	20–27	34.4–35.0
Equatorial Subsurface Water (ESW)	8–15	34.3–35.0

between the wind and CUI. Wind magnitude was slightly higher in Apr11 than in Feb11; however, because the directions were favorable for upwelling, CUI values higher than $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ were recorded on 16 days in Apr11 but only on 2 days in Feb11 (fig. 2c, d). A similar situation occurred in 2012, when 18 days in April but only one in February had CUI values higher than $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, values even exceeding $250 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ in April (fig. 2g, h), because of the upwelling-favorable wind conditions. The highest CUI values ranged from 85 to $140 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ in Feb11 and from 80 to $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ in Feb12 (fig. 2c, g). During Jul11, the intensity of the wind weakened and the corresponding CUI values were lower (fig. 2e); the negative CUI values (23 and 24 July) may be explained by the passage of Hurricane Dora. The upwelling events were less intense in Oct11 (fig. 2f) than in Apr11; seven values exceeded $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (fig. 2d), indicating a second, though less intense, upwelling season.

The vertical profiles of the thermohaline variables for all the stations on the two transect lines farthest from the coast (stations 5–68 and 4–67, fig. 1c) were averaged to show the variation in regional stratification in relation to the nucleus of the CC flow, far from the influence of the upwelling zone. The water column was less stratified in the winter and spring months of both years, with temperatures of 18°C at the surface and decreasing to $\sim 12^\circ\text{C}$ at 200 m depth (fig. 3). Maximum stratification was observed in Oct11, with temperatures of 27°C and 12°C at the surface and 200 m depth, respectively. A well-mixed layer was noticeable at the surface in Oct11 and reached 40 m in Feb12. An intermediate layer of low salinity (~ 33.8) was observed between 50 and 80 m depth in all the surveys. In Feb11, Apr11, and Apr12, this low salinity layer was observed from the surface to 80 m depth due to the influence of the CC in this area.

The distribution of temperature in the upper 10 m layer is shown in figure 4. In winter and spring, offshore surface temperatures were close to 18°C and an intense thermal front developed parallel to the shore. The presence of cold (min. 14°C , fig. 4b) and saline (max. 34.6 , fig. 5b) water near the coast in February and April of both years is due to the persistence of coastal upwelling in the study area. The thermal fronts in Feb11 and Feb12 (fig. 4a, e) were less intense than in Apr11 and Apr12 (fig. 4b, f). In contrast, in Jul11, the surface temperature distribution showed less variation;

campos de viento promedio mensuales no presentan mayores diferencias tanto en magnitud como en dirección, y por tal razón sólo se muestran los campos de 2011 (fig. 2a, b). En febrero, las magnitudes del viento fueron menores que en abril y la dirección predominante del viento fue del nornoroeste (fig. 2c). En abril, la dirección predominante del viento fue del noroeste con tendencia a ser paralela a la línea de costa, favoreciendo así el aumento de la surgencia costera (fig. 2d).

La figura 2c–h muestra las series de tiempo del viento (promedio diario) en el centro de la malla de muestreo (cuadro marcado en fig. 2a, b) y las del ISC en la latitud 24°N . Aunque estos puntos están situados a una distancia mayor que 80 km de la costa, se observó cierta coherencia entre el viento y el ISC. La magnitud del viento en Abr11 fue ligeramente mayor que en Feb11. Sin embargo, debido a las direcciones favorables a la surgencia, se observaron 16 días con ISC mayores que $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en Abr11 y solamente 2 días en Feb11 (fig. 2c, d). Una situación similar ocurrió en 2012, cuando se presentaron 18 días de abril y sólo un día en febrero con valores del ISC mayores que $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, incluso alcanzando valores mayores que $250 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en abril, debido a las direcciones favorables a la surgencia (fig. 2g, h). Los valores más altos del ISC variaron de 85 a $140 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en Feb11 y de 80 a $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en Feb12 (fig. 2c, g). Durante Jul11, se observó un debilitamiento en la intensidad del viento y los valores de los ISC correspondientes fueron menores (fig. 2e); los valores negativos del ISC (23 y 24 de julio) podrían explicarse por la influencia del paso del huracán Dora. Los eventos de surgencia fueron menos intensos en Oct11 (fig. 2f) que en Apr11; se observaron siete valores mayores que $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en Apr11 (fig. 2d), lo cual indicó una segunda temporada de surgencias, aunque de menor intensidad.

Se promediaron los perfiles verticales de las variables termohalinas en todas las estaciones de las dos líneas más alejadas de la costa (estaciones 5–68 y 4–67, fig. 1c) para mostrar la variación de la estratificación de la región con relación al núcleo del flujo de la CC, lejos de la influencia de la zona de surgencias. La columna de agua estuvo menos estratificada en los meses de invierno y primavera de ambos años (fig. 3). En ambos meses, la temperatura fue de 18°C en la superficie y disminuyó a $\sim 12^\circ\text{C}$ a 200 m de profundidad. La estratificación máxima se observó en Oct11, con temperaturas de 27°C y 12°C en la superficie y a 200 m de profundidad, respectivamente. Se observó una capa bien mezclada en la superficie en Oct11 que aumentó a 40 m en Feb12. También se observó una capa intermedia de baja salinidad (hasta de 33.8) entre 50 y 80 m de profundidad en todos los cruceros. En Feb11, Abr11 y Abr12, esta capa de baja salinidad se localizó desde la superficie hasta los 80 m de profundidad debido a la influencia de la CC en esta zona.

La distribución de temperatura en la capa de 10 m de profundidad se muestra en la figura 4. En invierno y primavera, afuera de la costa, se observó agua superficial con valores cercanos a 18°C y se desarrolló un intenso frente térmico

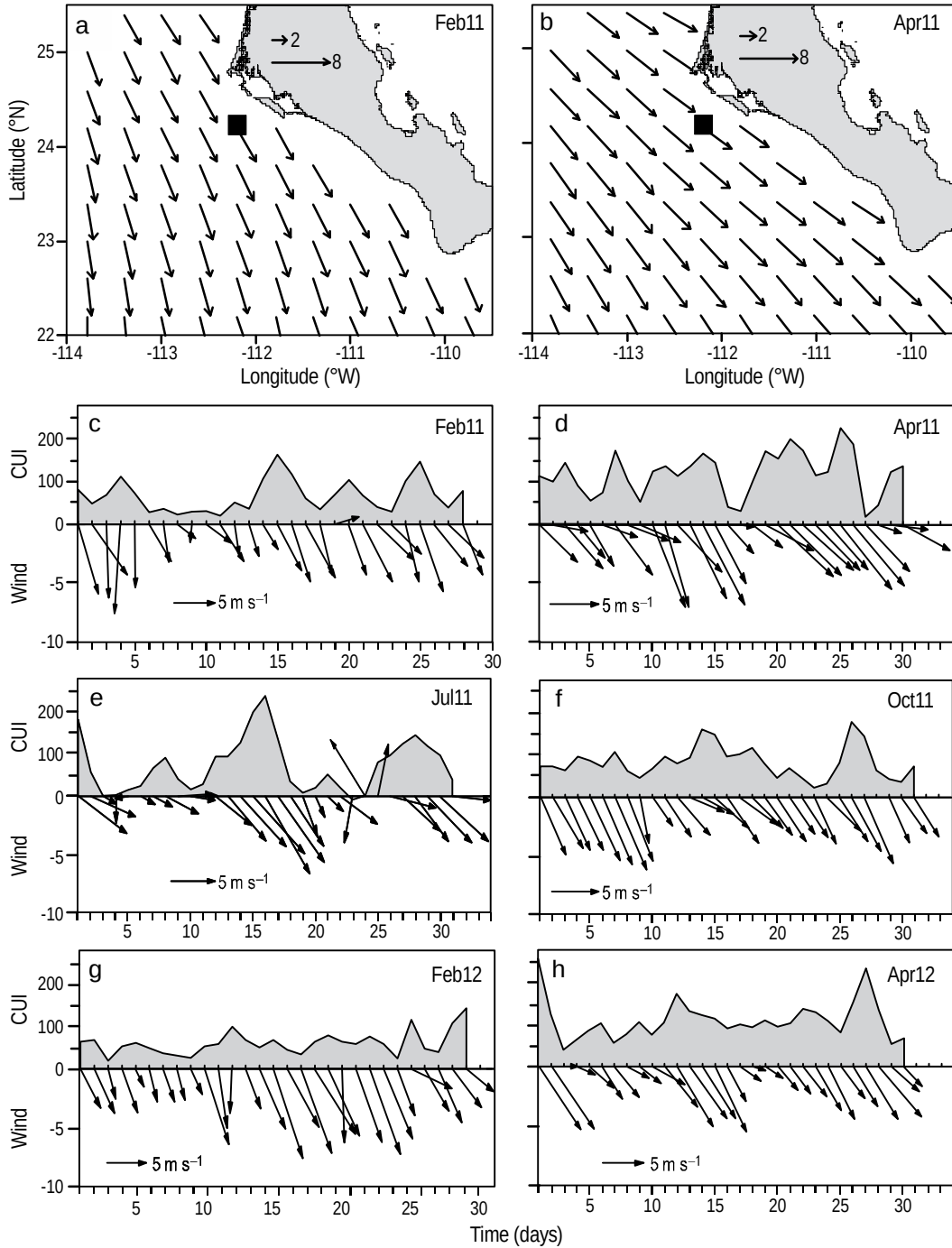


Figure 2. Wind fields in (a) February 2011 and (b) April 2011. (c–h) Coastal Upwelling Index (CUI, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ per 100 m of coastline) and mean diurnal wind vectors at the square marked in (a) and (b) for February 2011 (c), April 2011 (d), July 2011 (e), October 2011 (f), February 2012 (g), and April 2012 (h).

Figura 2. Campos de viento en (a) febrero y (b) abril de 2011. (c–h) Índice de Surgencia Costera (CUI, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ por 100 m de línea de costa) y vectores diurnos promedio del viento en el cuadro marcado en (a) y (b) para febrero de 2011 (c), abril de 2011 (d), julio de 2011 (e), octubre de 2011 (f), febrero de 2012 (g) y abril de 2012 (h).

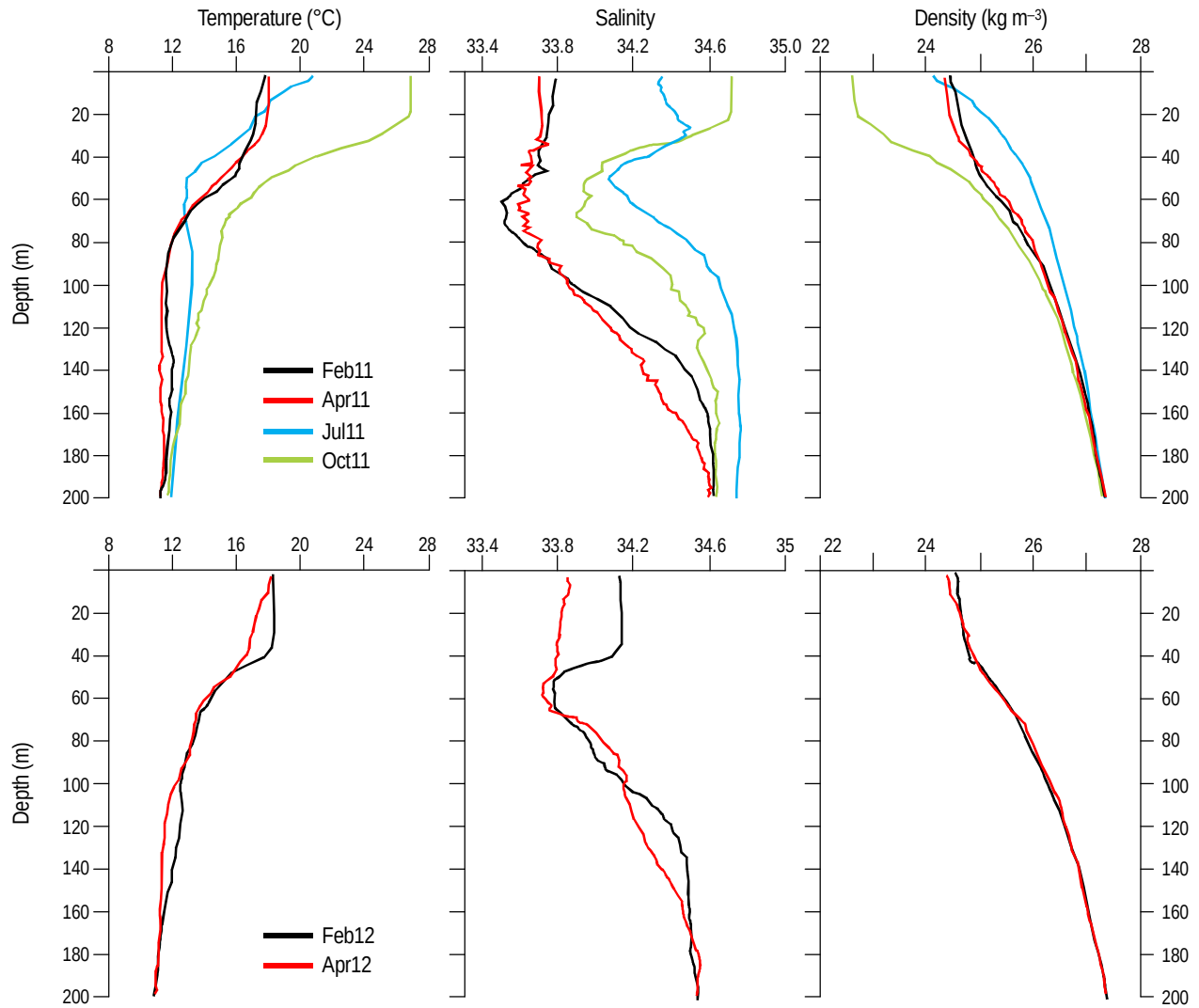


Figure 3. Average profiles of the thermohaline variables along the two most offshore transect lines (stations 5–68 and 4–67 in fig. 1c) for all cruises.

Figura 3. Perfiles promedio de las variables termohalinas en las dos líneas más alejadas de la costa (estaciones 5–68 y 4–67 en fig. 1c) para todos los cruceros.

temperatures ranged from 17.5 to 19 °C and were slightly warmer in the southern part of the study area, reaching 20.5 °C near the coast (fig. 4c). In Oct11, a patch of cooler (24.0 °C), less saline (34.4) water was observed in the north-western part of the study area (figs. 4d, 5d). Only in this month was the intrusion of warm water observed in the center of the sampling grid (with temperature equal to or higher than 27 °C), apparently of tropical origin as indicated by its salinity range (see fig. 5d).

The distribution of salinity in the upper 10 m layer in winter and spring showed a similar pattern to that of surface temperature, with a strong ocean–coast gradient near the coast (fig. 5). This gradient was stronger in the two April cruises and in the southeastern part of the study area. Except in Feb12, in winter and spring the most offshore stations showed a nearly uniform salinity field, with little variation in

paralelo a la costa. La presencia de agua fría (de hasta 14 °C, fig. 4b) y salina (hasta de 34.6, fig. 5b) cerca de la costa durante febrero y abril de ambos años se debe a la persistencia de las surgencias costeras en el área de estudio. Los frentes térmicos en Feb11 y Feb12 (fig. 4a, e) fueron menos intensos en comparación con Abr11 y Abr12 (fig. 4b, f). En contraste, en Jul11, la distribución de temperatura superficial mostró variaciones menores; la temperatura varió entre 17.5 y 19 °C y fue ligeramente más cálida en la parte sur del área de estudio, donde alcanzó 20.5 °C cerca de la costa (fig. 4c). En Oct11, se observó una parcela de agua con menor temperatura (24.0 °C) y salinidad (34.4) en la porción noroeste de la malla de muestreo (figs. 4d, 5d). Sólo en este mes se observó la intrusión de agua cálida en el centro de la malla (con temperatura igual o superior a 27 °C), al parecer de origen tropical por su intervalo de salinidad (ver fig. 5d).

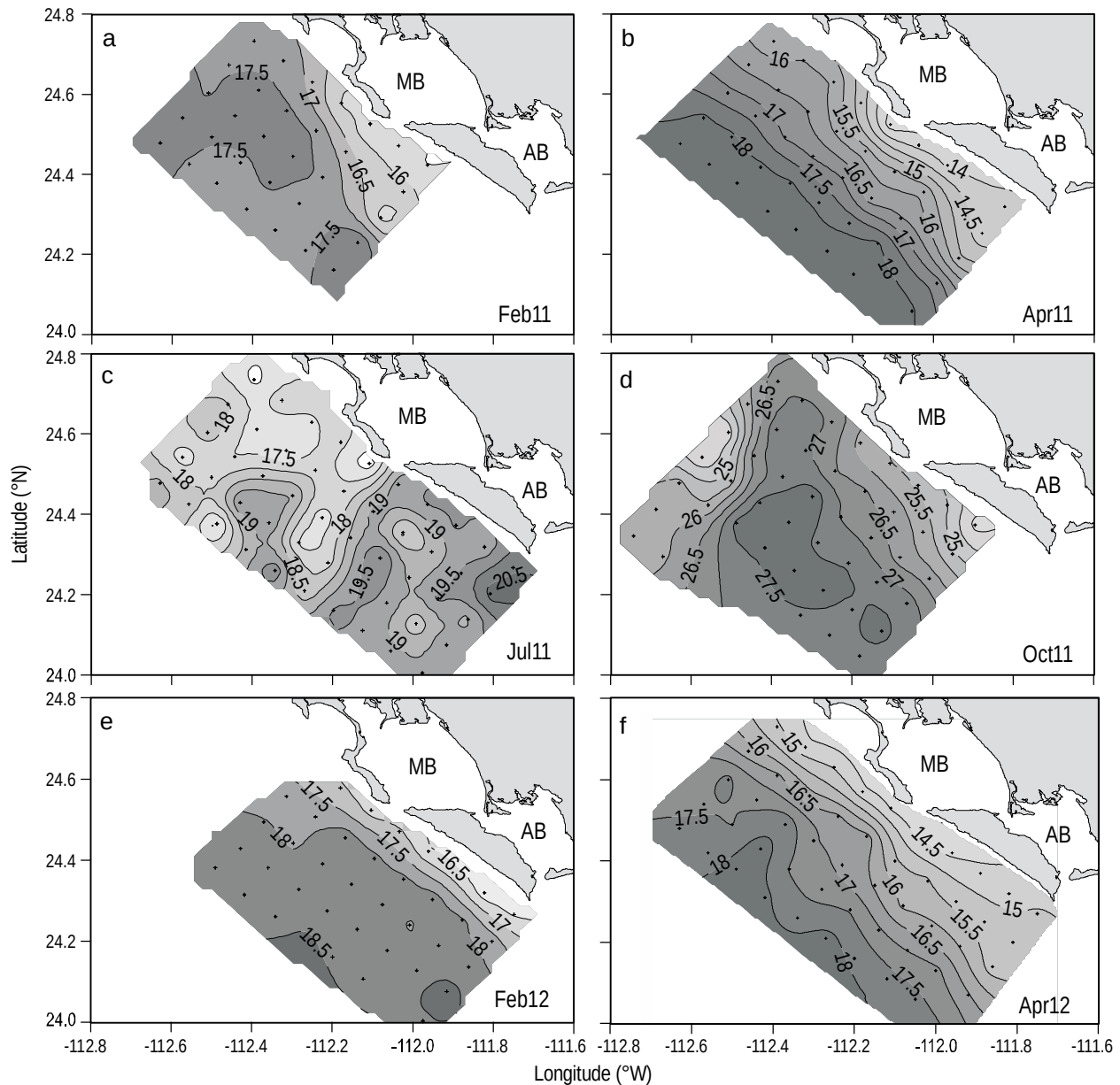


Figure 4. Surface temperature (°C) distribution in the upper 10 m layer for all cruises. MB, Magdalena Bay; AB, Almejas Bay.

Figura 4. Distribución de temperatura (°C) en la capa superficial de 10 m para todos los cruceros. MB, bahía Magdalena; AB, bahía Almejas.

the range of 33.7 to 34.0, indicating the effect in the region of modified CC water (fig. 5a, b, f). In Feb12, the coastal gradient and influence of the CC were weaker and salinity values were higher, between 34.0 and 34.2 (fig. 5e). In Jul11, salinity was lowest (33.8) at the oceanic stations in the northern part of the study area and increased shoreward to 34.7 (fig. 5c). In Oct 11 (fig. 5d), the surface salinity field was almost uniform, values ranging from 34.7 to 34.8, except in the middle of the northwestern part of the grid where it decreased to 34.6; these values are typical of subtropical surface waters.

At 80 m depth, the temperature and salinity fronts related to coastal upwelling were not as strong as at 10 m depth

Las distribuciones de salinidad en la capa de 10 m de profundidad en invierno y primavera mostraron un patrón similar al de la temperatura superficial, con un gradiente océano–costa muy intenso cerca de la costa (fig. 5). Este gradiente fue más intenso en los dos cruceros de abril y en la parte suroriental del área del estudio. Excepto en Feb12, durante invierno y primavera las estaciones más alejadas de la costa mostraron un campo de salinidad prácticamente uniforme, con poca variación dentro del intervalo de 33.7 a 34.0, mostrando el efecto en la región del agua modificada de la CC (fig. 5a, b, f). En Feb12, el gradiente costero y la influencia de la CC fue más débil y la salinidad alcanzó valores más elevados, entre 34.0 y 34.2 (fig. 5e). En Jul11, la salinidad

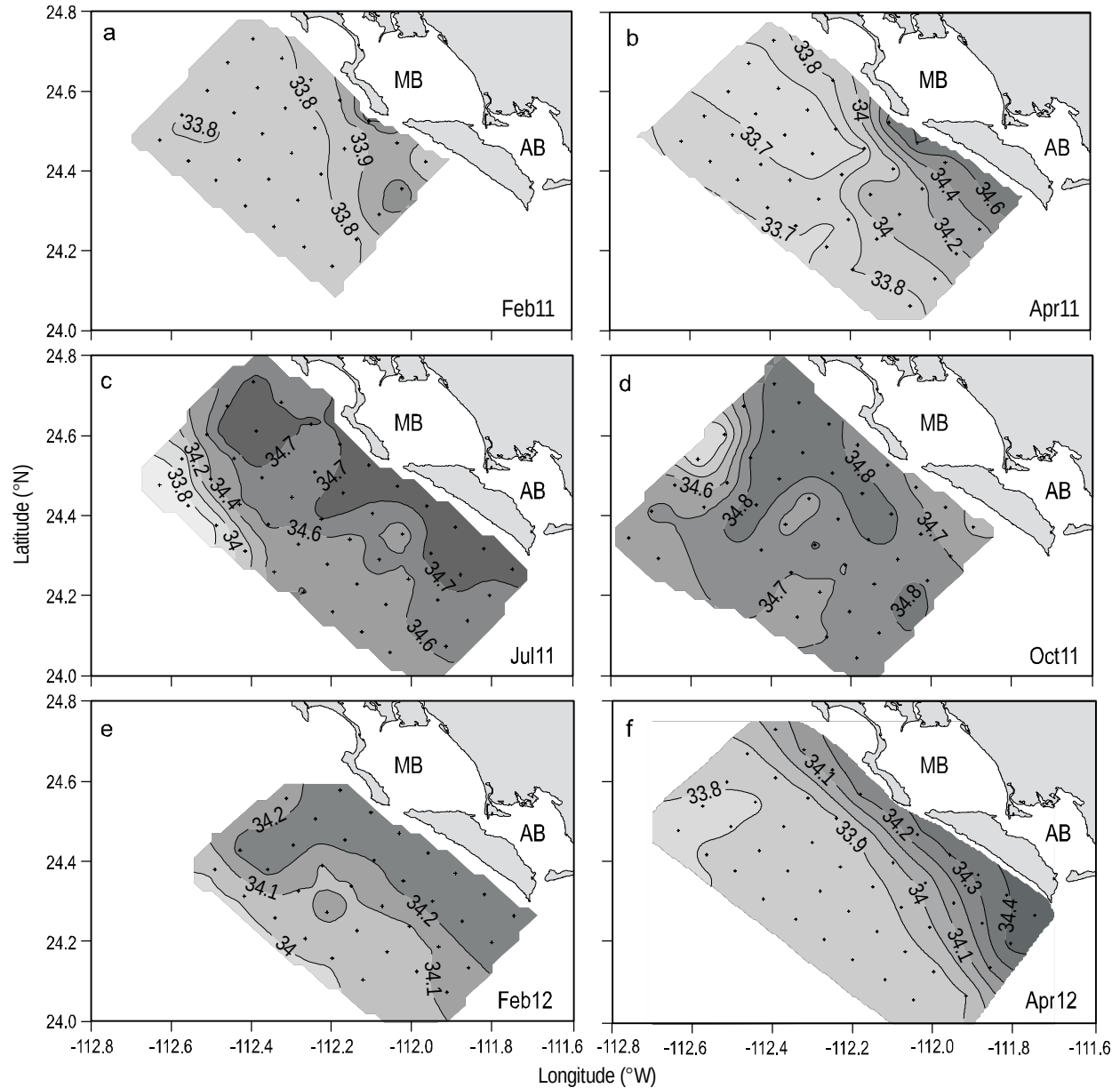


Figure 5. Surface salinity distribution in the upper 10 m layer for all cruises. MB, Magdalena Bay; AB, Almejas Bay.

Figura 5. Distribución de salinidad en la capa superficial de 10 m para todos los cruceros. MB, bahía Magdalena; AB, bahía Almejas.

(figs. 6, 7). In Feb11, subsurface intrusion of warmer water was observed near the coast, especially in the southern part of the study area; temperatures ranged from 14.5 °C at the near-shore stations to 12 °C offshore (fig. 6a). In Apr11, Feb12, and Apr12, the temperature field at 80 m depth was almost homogeneous, with differences of ~ 0.5 °C (fig. 6b, e, f). Among these three surveys, the lowest temperature field was observed in Apr11, with values ranging from 11.5 to 12.0 °C, though temperatures of 12.5 °C were recorded in the southern part of the grid (fig. 6b). The pattern for Jul11 was similar to that of Feb11, except that the ocean–coast gradient was not as marked and water temperatures above 13 °C were recorded in nearly all the study area (fig. 6c). In Oct11, most of the study

superficial mínima de 33.8 se registró en las estaciones más alejadas (norte de la malla de muestreo) y aumentó hacia la costa hasta alcanzar valores de 34.7 (fig. 5c). En Oct11, el campo de salinidad fue casi uniforme y varió sólo entre 34.7 y 34.8, excepto en la región central del noroeste de la malla de muestreo, donde disminuyó a 34.6; estos valores son típicos de las aguas subtropicales superficiales.

A 80 m de profundidad, los frentes térmicos y de salinidad relacionados con surgencias costeras no fueron tan intensos como a 10 m (figs. 6, 7). En Feb11, se observó a esa profundidad una intrusión de agua con mayor temperatura en las estaciones costeras, especialmente en el sur de la malla de muestreo; la temperatura varió de 14.5 °C cerca de la costa a

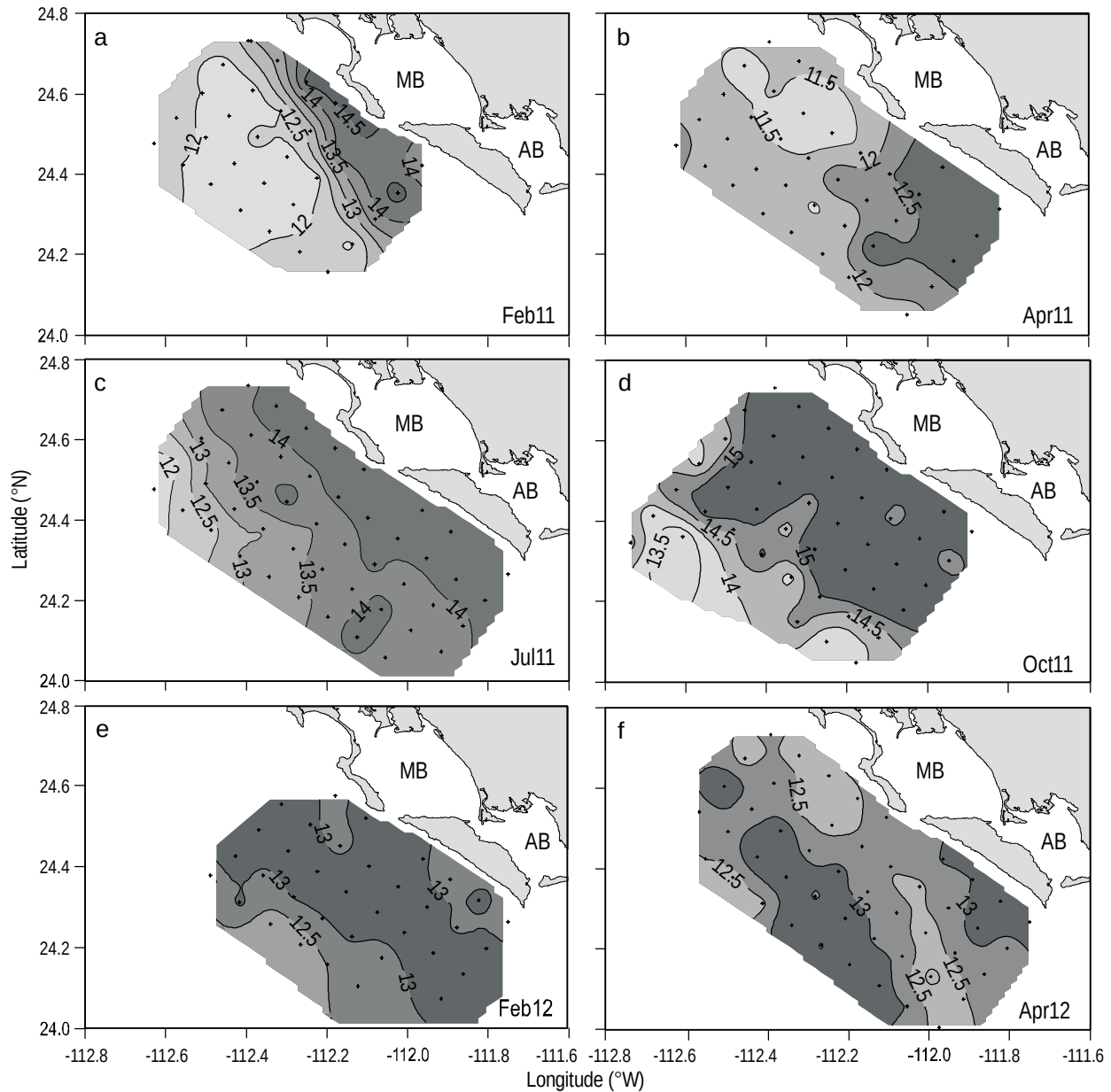


Figure 6. Temperature (°C) distribution at 80 m depth. MB, Magdalena Bay; AB, Almejas Bay.

Figura 6. Distribución de temperatura (°C) a los 80 m de profundidad. MB, bahía Magdalena; AB, bahía Almejas.

area was dominated by temperatures of 15 °C; values below 14.0 °C were recorded only at the most offshore stations (fig. 6d).

Salinity at 80 m depth also presented coast–ocean fronts in winter and spring. They were more marked in Feb11 (fig. 7a) and Apr11 (fig. 7b) with approximate gradients of 0.50 and 0.35, respectively, over 10 km. Salinity was 33.7, typical of modified CC water, at the oceanic stations and ~34.4, characteristic of subtropical water, close to the coast in the southeastern part of the study area. In Jul11, salinity values higher than 34.5 were recorded in most of the study area, except at the northwesternmost stations, where values close

12 °C mar adentro (fig. 6a). En Abr11, Feb12 y Abr12, el campo de temperatura a 80 m de profundidad fue casi homogéneo, con diferencias cercanas a 0.5 °C (fig. 6b, e, f). Entre estos tres escenarios, el campo de menor temperatura se presentó en Abr11, con valores de 11.5 a 12.0 °C, aunque en la parte sur de la malla de muestreo se observaron temperaturas de 12.5 °C (fig. 6b). En Jul11 se observó un patrón similar al de Feb11, con la diferencia de que el gradiente océano–costa no fue tan intenso y el agua con temperatura mayor que 13 °C estuvo distribuida en casi toda el área de estudio (fig. 6c). En Oct11, gran parte del área de estudio estuvo dominada por valores de 15 °C, y solamente en las estaciones más alejadas

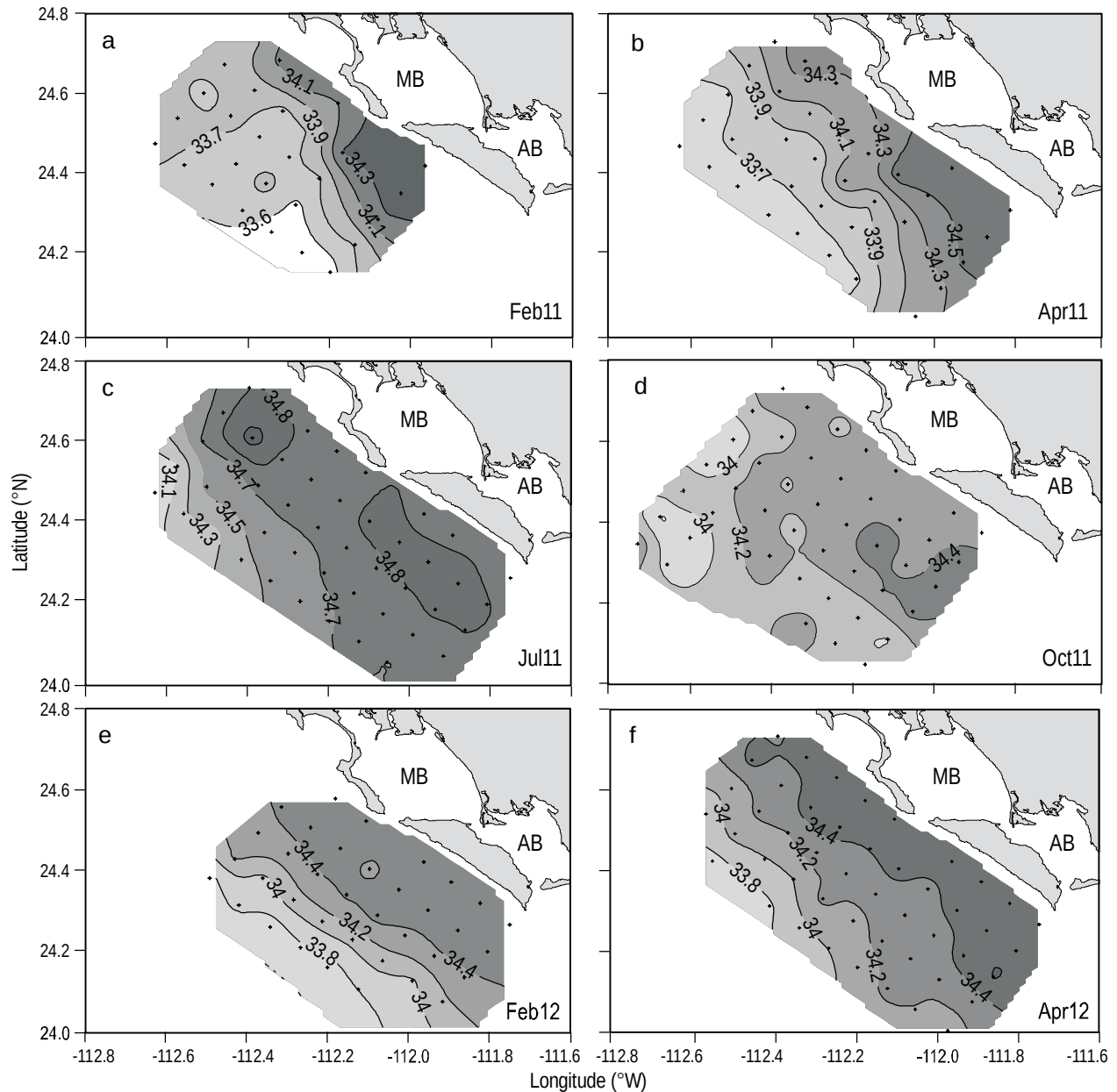


Figure 7. Salinity distribution at 80 m depth. MB, Magdalena Bay; AB, Almejas Bay.

Figura 7. Distribución de salinidad a los 80 m de profundidad. MB, bahía Magdalena; AB, bahía Almejas.

to 34.1 were found (fig. 7c). In Oct11, salinity ranged from 34.0 at the oceanic stations to 34.4 near the coast (fig. 7d).

Temperature and salinity distributions in a vertical cross section of a transect line (stations 29–33) initiating at the mouth of Magdalena Bay are shown in figure 8. The Feb11 temperature section shows a rising of the 16 and 17 °C isotherms between stations 30 and 31 (fig. 8a), forming a weak surface thermal front of 16–17 °C, whereas the 14 and 15 °C isotherms deepen to 100 m depth. This is evidence of a process that occurs during and after coastal upwelling. The baroclinic response of the isotherm is the opposite of the rising of the most superficial structure, and it deepens (Gill 1982).

de la costa se encontraron temperaturas menores que 14 °C (fig. 6d).

La salinidad a 80 m de profundidad también presentó frentes costa–océano en invierno y primavera. Éstos fueron más marcados en Feb11 (fig. 7a) y Abr11 (fig. 7b) con gradientes aproximados de 0.50 y 0.35, respectivamente, en 10 km; la salinidad fue de 33.7, típica del agua modificada de CC, en las estaciones oceánicas y de ~34.4, típica del agua subtropical, cerca de la costa al suroriente de la malla de muestreo. En Jul11, la mayor parte del área de estudio presentó salinidades superiores a 34.5, y sólo en las estaciones más noroccidentales se encontraron salinidades cercanas a

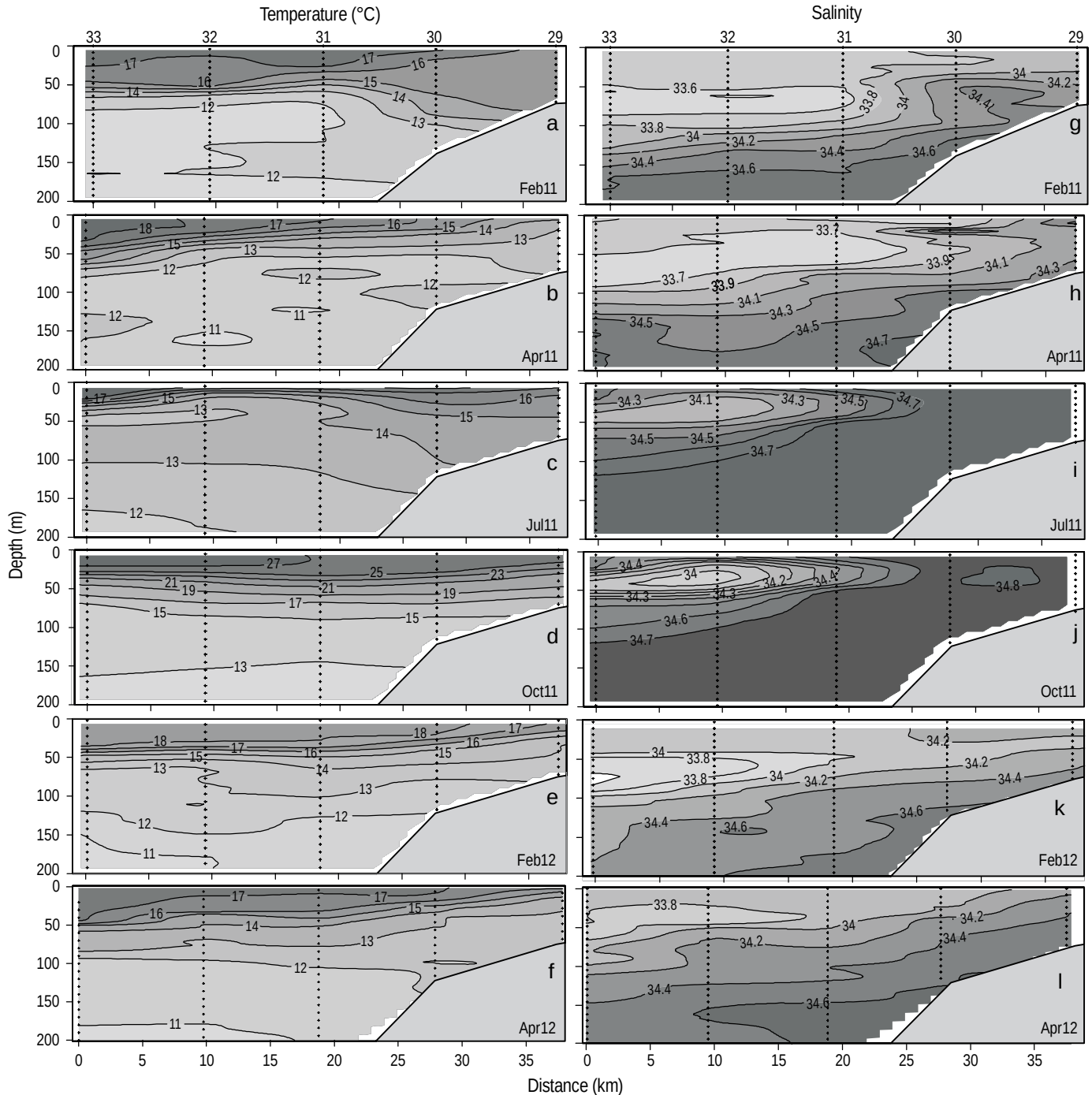


Figure 8. Temperature and salinity distributions in a vertical cross section between stations 29 and 33 (numbers at the top) (fig. 1c) for all cruises.

Figura 8. Distribución de temperatura y salinidad en la sección vertical transversal entre las estaciones 29 y 33 (números en la parte superior) (fig.1c) para todos los cruceros.

Salinity showed a strong front between stations 30 and 31 (33.6–34.4 over 9 km) centered at 50 m. Between stations 31 and 33, at 50 to 80 m depth, salinity was lower than 33.8, indicating the presence of CC water.

The February and April sections of both years display many similar features. All show the rising of the isotherms

34.1 (fig. 7c). En Oct11, la salinidad varió de 34.0 en las estaciones oceánicas a 34.4 cerca de la costa (fig. 7d).

En la figura 8 se muestran las secciones transversales de temperatura y salinidad de un transecto (estaciones 29–33) que inicia en la entrada de bahía Magdalena. La sección de Feb11 muestra un levantamiento de las isothermas de 16 y

and, to a different extent, the baroclinic response of the thermocline, which is consistent with coastal upwelling (fig. 8b, e, f). The upwelling pattern in these periods can also be observed in the salinity sections (fig. 8h, k, l), with values higher than 34.0 near the coast and to more than 80 m depth. In Apr11, the 14 °C isotherm shows the maximum excursion observed, rising from 60 m depth to the surface (fig. 8b). The intrusion of CC water also occurs in Apr11, clearly marked by salinities lower than 33.7 (fig. 8h). Feb12 and Apr12 showed similar patterns, except that low salinity water (< 33.8) occupied a shallower layer (30–50 m) in the latter.

A structure corresponding to a poleward geostrophic flow was observed in Jul11 (fig. 8c). According to the thermal wind law, nearshore warm water is consistent with a geostrophic flow towards the interior of the section (to the north), which in the salinity sections shows a coastal composition that corresponds to subtropical water because of its relatively high temperature and salinity of 34.7 or higher (fig. 8c, i). In Oct11, the salinity structure observed in July reappeared, but then the near-surface temperature was much higher. Moreover, in Oct11, the water column was uniformly stratified (fig. 8d), with surface temperatures of >25 °C at nearshore stations and >27 °C at oceanic stations. During these months, a reduced salinity range was observed in the upper 100 m between stations 31 and 33, with a minimum value of ~34.0 between 20 and 50 m depth (fig. 8i, j). The salinity of shelf waters and at depths greater than 100 m was almost homogeneous, with values of 34.7 to 34.8, characteristic of subtropical water.

Figure 9 shows the temperature–salinity diagrams for the sampling periods. In winter and spring of 2011 and 2012, Subarctic Water (SAW) was detected to 100 m depth, with characteristics typical of water transported by the CC (fig. 9a, b, e, f); this water mass was better represented in 2011 from the surface to 100 m. Below 150 m depth, the area was dominated by Equatorial Subsurface Water (ESW). In Jul11, SAW (blue color in fig. 9c) was observed only at some offshore stations in the northern part of the study area and in the upper 100 m layer, indicating the intrusion of water from the north. In Oct11, SAW was observed in a subsurface layer, between 50 and 100 m depth, at all the northern stations and some central stations. In the southern part (red color in fig. 9c, d), in Jul11 and Oct11 there was no evidence of SAW in the water column. Subtropical Surface Water (SSW) was observed only in Jul11 and Oct11 in the upper 100 m layer, with greater presence in the latter.

The temperature–salinity diagrams (fig. 9) indicate that the relative salinity minimum, associated with the nucleus of the CC, is found at the 25 kg m⁻³ isopycnal. The density behavior indicates that the water associated with the 25 kg m⁻³ isopycnal (hereinafter 25 σ_t) rises from 50 m depth in Feb12 and Apr12 and from 70 m depth in Apr11 (fig. 10). The Apr11 and Apr12 upwelling indices were similar in magnitude, except that the CUI tended to decrease in 2011 and to

17 °C entre las estaciones 30 y 31 (fig. 8a), formando un débil frente térmico superficial de 16–17 °C, mientras que las isotermas de 14 y 15 °C se profundizaron hasta 100 m. Esto es evidencia de un proceso que ocurre durante y después de una surgencia costera. La respuesta baroclínica de la isoterma es opuesta a la elevación de la estructura más superficial y se vuelve más profunda (Gill 1982). Entre las estaciones 30 y 31, la salinidad mostró un frente intenso (33.6–34.4 en 9 km) centrado en 50 m. Entre las estaciones 31 y 33, en la capa de 50 a 80 m, la salinidad fue menor que 33.8, indicando la presencia de agua de la CC.

Las secciones en febrero y abril de ambos años presentan muchas características en común. En todas ellas se observó el levantamiento de las isotermas y, en diferente grado, la respuesta baroclínica de la termoclina, lo cual es consistente con el fenómeno de surgencia costera (fig. 8b, e, f). El patrón de surgencia en estos periodos también se pudo observar en las secciones de salinidad (fig. 8h, k, l), con valores mayores que 34.0 cerca de la costa y a profundidades mayores que 80 m. En Abr11, la isoterma de 14 °C exhibió la máxima excursión observada, con un ascenso desde 60 m de profundidad hasta la superficie (fig. 8b). También en Abr11 ocurre la intrusión de agua de la CC, claramente marcada por salinidades menores que 33.7 (fig. 8h). En Abr12, se observó un patrón similar al de Feb12, con la diferencia de que el agua con baja salinidad (< 33.8) ocupó una capa más somera (30–50 m) en Abr12.

En Jul11, se observó la estructura correspondiente a un flujo geostrófico hacia el polo (fig. 8c). Según la regla de viento térmico, el agua cálida cerca de la costa es consistente con un flujo geostrófico hacia adentro de la sección (hacia el norte), el cual en los cortes de salinidad muestra una composición costera que corresponde al agua de origen subtropical por su temperatura relativamente alta y salinidad de 34.7 o mayor (fig. 8c, i). En Oct11, se repitió la estructura de salinidad observada en julio, aunque ahora la temperatura cercana a la superficie fue mucho mayor. Además, en Oct11 la columna de agua se encontró uniformemente estratificada (fig. 8d), con la temperatura superficial mayor que 25 °C en la costa y mayor que 27 °C en las estaciones más oceánicas. En estos meses, la salinidad en la capa de 100 m de profundidad entre las estaciones 31 y 33 presentó un intervalo reducido, con un valor mínimo de ~34.0 entre 20 y 50 m (fig. 8i, j). La salinidad en la plataforma continental y en las profundidades mayores que 100 m fue prácticamente homogénea y alcanzó valores de 34.7 a 34.8, característico del agua subtropical.

La figura 9 muestra los diagramas de temperatura y salinidad para los periodos muestreados. En invierno y primavera de 2011 y 2012, se detectó Agua Subártica (AS) hasta 100 m de profundidad, con las características típicas del agua transportada por la CC (fig. 9a, b, e, f); se observó una mayor representación de esta masa de agua en 2011 desde la superficie hasta 100 m. A profundidades mayores que 150 m, el área

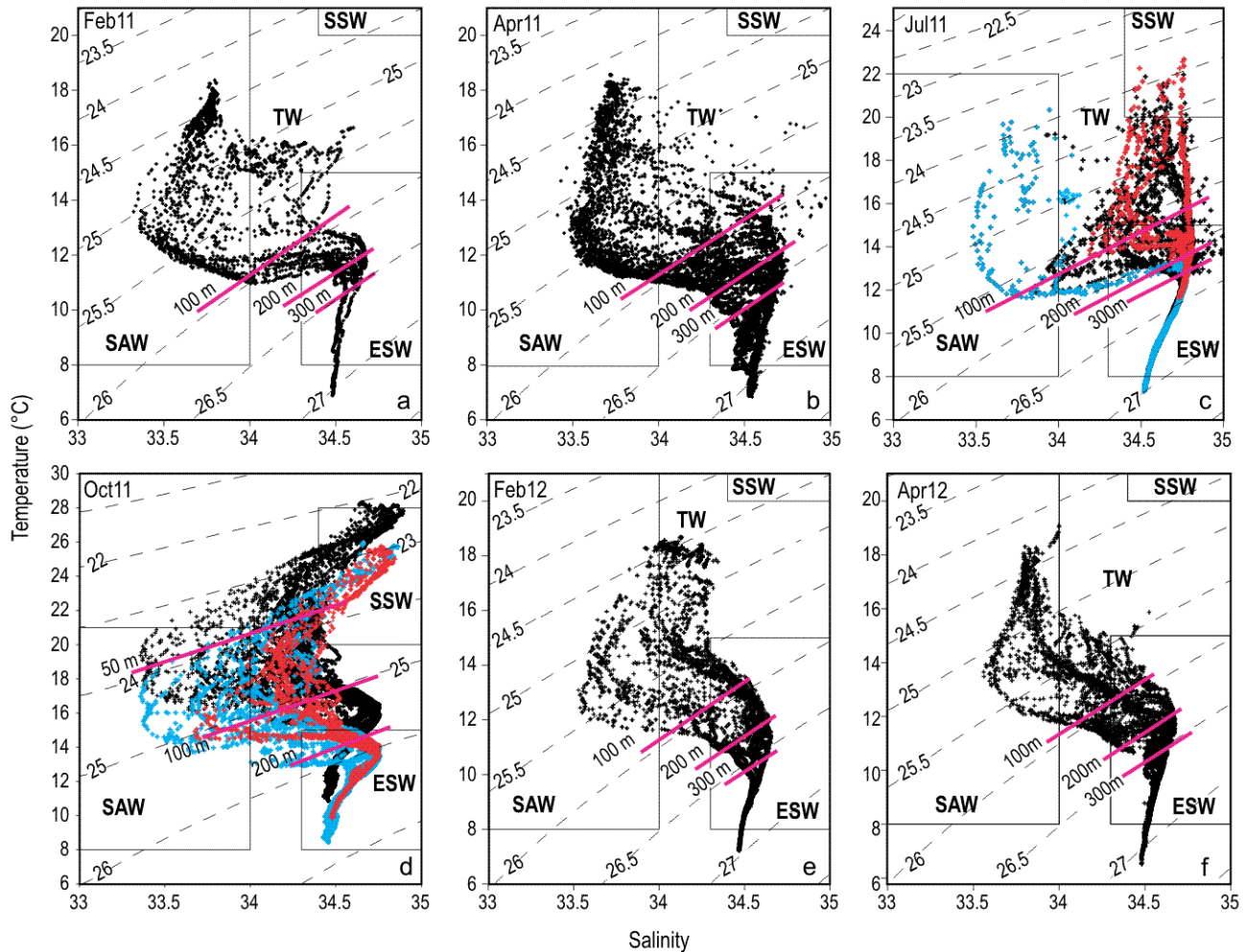


Figure 9. Temperature–salinity diagram for all cruises. SAW, Subarctic Water; SSW, Subtropical Surface Water; ESW, Equatorial Subsurface Water; TW, Transition Water. For a better contrast of the water masses, the data from the two northernmost transect lines are marked in blue and the data from the two southernmost transect lines are marked in red. Pink lines indicate depth.

Figura 9. Diagramas de temperatura y salinidad para todos los cruceros. SAW, Agua Subártica; SSW, Agua Subtropical Superficial; ESW, Agua Ecuatorial Subsuperficial; TW, Agua de Transición. Para un mejor contraste entre las diferentes masas de agua, los datos de las dos líneas del norte de la malla de muestreo están marcados en color azul y los datos de las dos líneas del sur están marcados en rojo. Las líneas rosas indican profundidad.

increase in 2012. Note that the depth of the $25 \sigma_t$ isopycnal at the most offshore stations concurs with the depth of the salinity minimum in figure 8.

The topography of the $26 \sigma_t$ isopycnal surface in Apr11 and the temperature and salinity distributions along this surface (fig. 11) were constructed as described by Jerónimo and Gómez-Valdés (2006). This surface was inclined, with minimum depth (< 20 m) near the coast and the deepest part (> 90 m) at the stations farthest from the coast (fig. 11a), indicating a well-defined upwelling pattern. The temperature and salinity distributions on the $26 \sigma_t$ surface show a moderate gradient towards the coast (fig. 11c, d). To the southeast, temperatures above 13.8°C were found near the coast, which are relatively high for this depth, compensated by an increase in salinity (> 34.5), similar to the signal of the presence of modified subtropical water. Hence, in summer the northwestern

estuvo dominada por Agua Ecuatorial Subsuperficial (AES). En Jul11, el AS (color azul en fig. 9c) fue observada solamente en algunas de las estaciones alejadas de la costa en la parte norte del área de estudio y a profundidades de hasta 100 m, lo cual demuestra la intrusión del agua proveniente del norte. En Oct11, las manifestaciones de AS se observaron en una capa subsuperficial, entre 50 y 100 m profundidad, en todas las estaciones del norte y algunas estaciones centrales. En la parte sur de la malla de muestreo (color rojo en fig. 9c, d), en Jul11 y Oct11 no se encontraron señales de AS en toda la columna. Sólo en estos dos periodos de muestreo se observó Agua Subtropical Superficial (ASS) en los primeros 100 m, con una mayor presencia en octubre.

Los diagramas de temperatura y salinidad (fig. 9) para el área de estudio indican que el mínimo relativo de salinidad, asociado con el núcleo de la CC, está centrado en la isopícnica

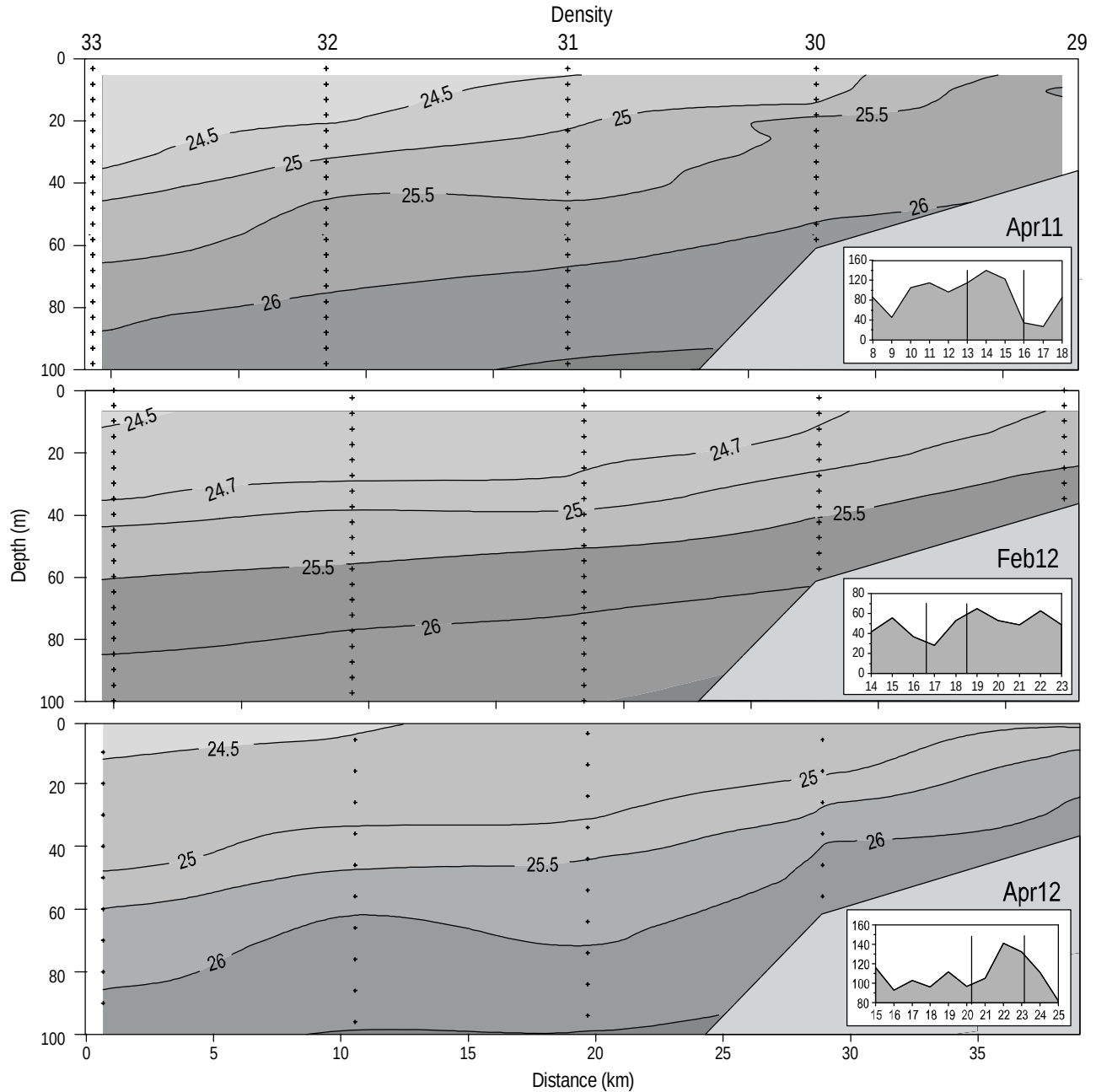


Figure 10. Density distribution in a vertical cross section between stations 29 and 33 (numbers at the top) in April 2011, February 2012, and April 2012. Internal diagrams show the time series of the Coastal Upwelling Index ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ per 100 m of coastline). The vertical lines mark the sampling periods.

Figura 10. Distribución de densidad en la sección vertical transversal entre las estaciones 29 y 33 (números en la parte superior) en abril de 2011, febrero de 2012 y abril de 2012. Los diagramas internos muestran la serie de tiempo del Índice de Surgencias Costeras ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ por 100 m de línea de costa). Las líneas verticales muestran los periodos de observaciones.

Pacific transition zone develops in the study area, where warm, salty subtropical water and cold, less salty subarctic water converge.

The composite weekly images of sea surface temperature (SST) obtained from the MODIS-Aqua sensor for the 2011 cruises are shown in figure 12. In Feb11 (fig. 12a), SST in all the area in front of MAB was between 18 and 19 °C, with

de 25 kg m^{-3} . El comportamiento de la densidad muestra que el agua asociada a las isopícnas de 25 kg m^{-3} (en adelante 25 σ_t) aflora desde 50 m de profundidad en Feb12 y Abr12 y desde 70 m de profundidad en Abr11 (fig. 10). Los índices de surgencia en Abr11 y Abr12 fueron similares en magnitud, con la diferencia de que en 2011 tendieron a disminuir y en 2012 a aumentar. Es importante notar que la profundidad de

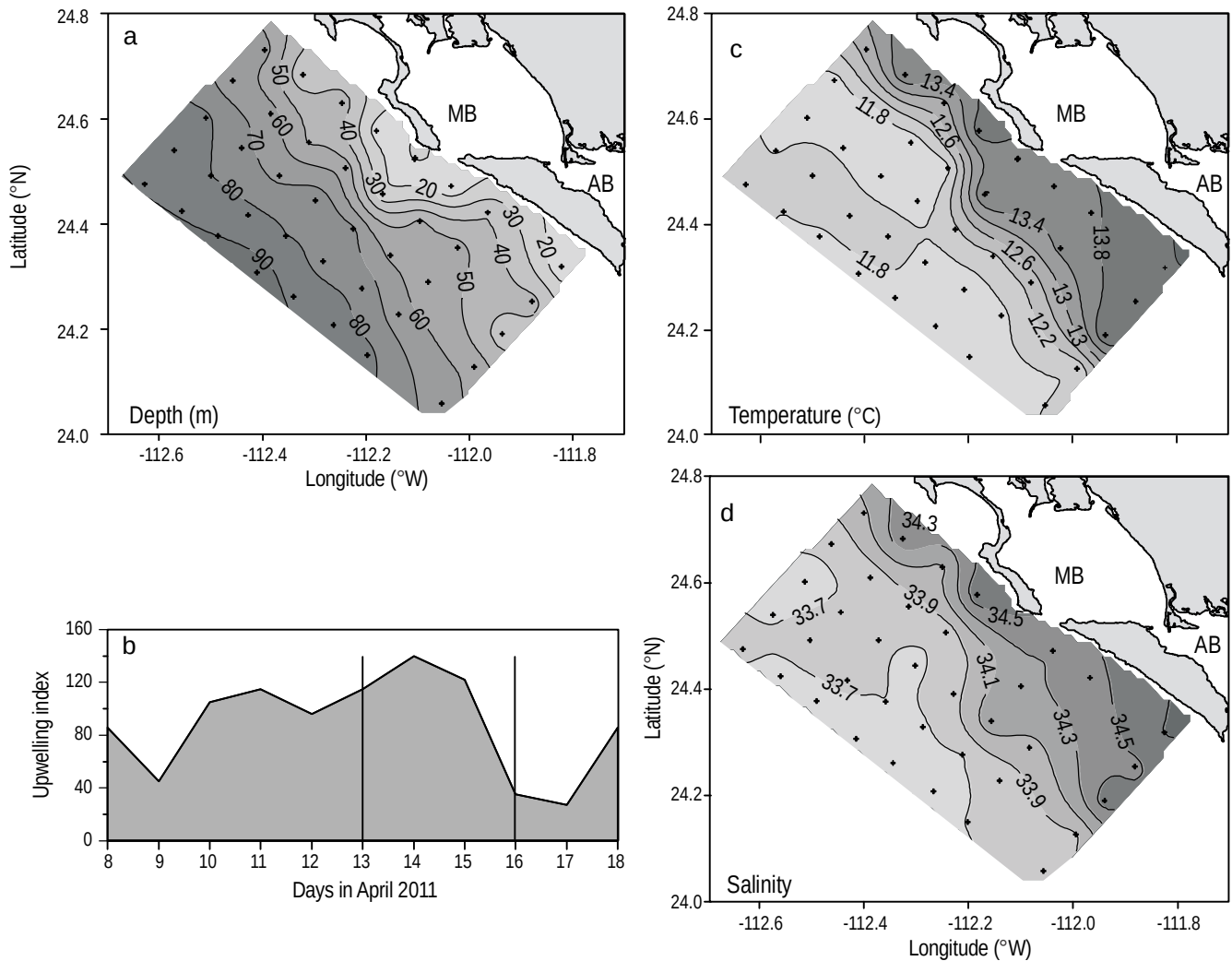


Figure 11. (a) Topography of the 26 kg m⁻³ isopycnal surface in April 2011, (b) Coastal Upwelling Index (m³ s⁻¹ per 100 m of coastline), (c) potential temperature, and (d) salinity on the isopycnal surface.

Figura 11. (a) Topografía de la superficie isopícnica de 26 kg m⁻³ en abril de 2011, (b) Índice de Surgencia Costera (m³ s⁻¹ por 100 m de línea de costa), (c) temperatura potencial y (d) salinidad en la superficie isopícnica.

colder water (<18°C) occurring in the adjacent areas. SST increased gradually towards the south to 21 °C. In Apr11 (fig. 12b), the distribution of SST was characterized by the presence of cold water in a fringe parallel to the coast, which is evidence of coastal upwelling. SST was 16 °C off MAB, with an offshore extension in front of the entrance to Almejas Bay. Warmer water was observed to the south, with SST between 18 and 21 °C and up to 23 °C off Cabo San Lucas. In Jul11 (fig. 12c), the isotherms were oriented perpendicular to the coast, increasing from 21 °C in the north to 28 °C off Cabo San Lucas. In Oct11 (fig. 12d), warm water was observed in a tongue parallel to the coast, consistent with the presence of the poleward current reported to the north of this region by Durazo and Baumgartner (2002).

The spatial distribution of chlorophyll *a* (weekly composites) derived from MODIS-Aqua data is shown in figure 13 for

la isopícnica de 25 σ_t en las estaciones más alejadas de la costa concuerda con la profundidad del mínimo de salinidad en la figura 8.

La topografía de la superficie isopícnica de 26 σ_t en Abr11 y las distribuciones de temperatura y salinidad en esta superficie (fig. 11) fueron construidas de manera similar a la descrita por Jerónimo y Gómez-Valdés (2006). Esta superficie estuvo inclinada con profundidad mínima (<20 m) cerca de la costa y la parte más profunda (>90 m) en las estaciones alejadas de la costa (fig. 11 a), lo cual demuestra el patrón de surgencia bien desarrollado. Las distribuciones de temperatura y salinidad en la superficie de 26 σ_t muestran un gradiente moderado hacia la costa (fig. 11c, d). Al sureste de la malla de muestreo, cerca de la costa, se encontraron temperaturas mayores que 13.8 °C, relativamente altas para esta profundidad, compensadas por un aumento en la salinidad

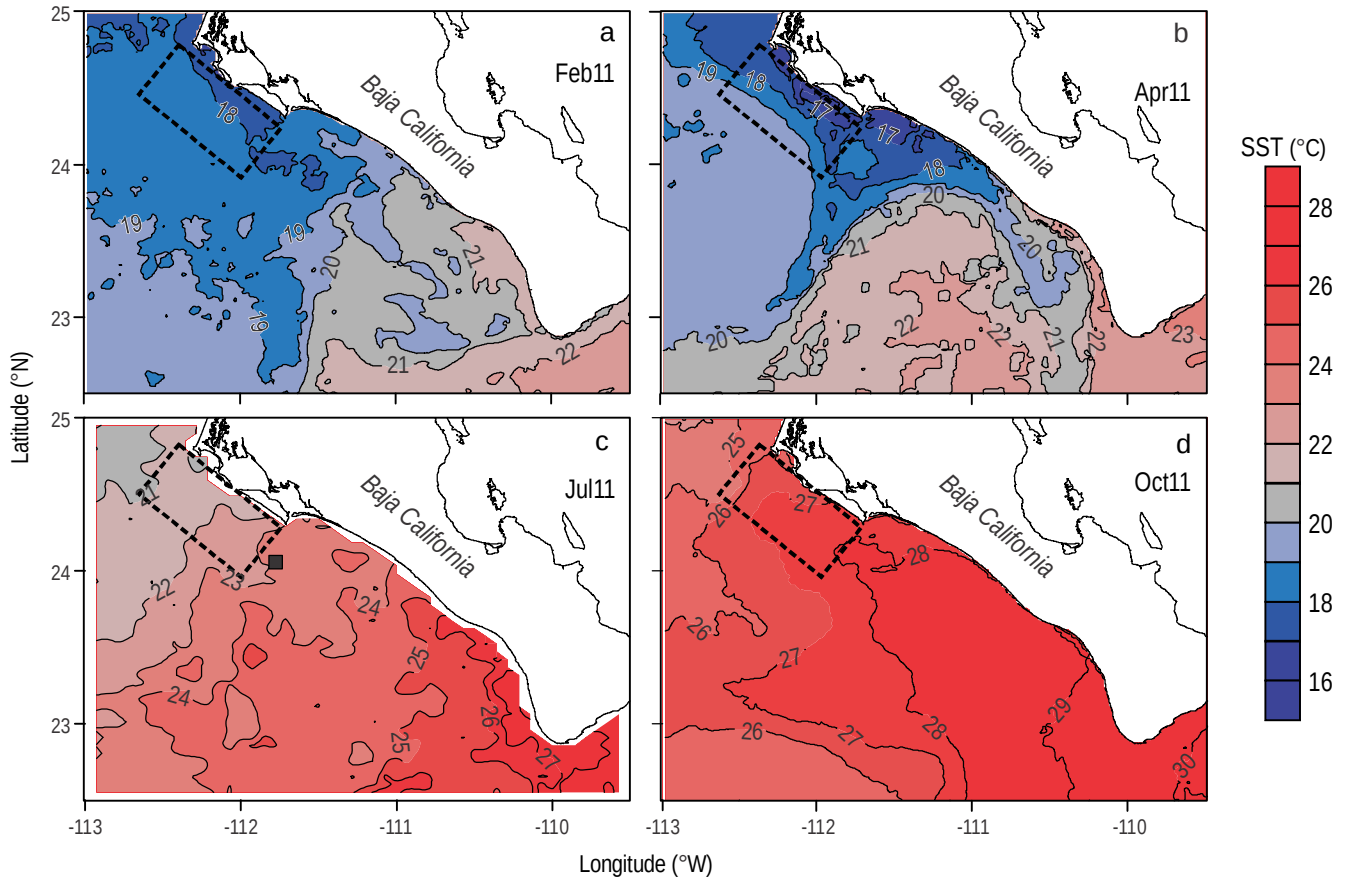


Figure 12. Averaged weekly sea surface temperature (SST) distribution derived from daily MODIS-Aqua images during the (a) February, (b) April, (c) July, and (d) October 2011 cruises. The rectangle marks the study area.

Figura 12. Distribución promedio semanal de temperatura superficial del mar (SST) derivada de las imágenes diarias de MODIS-Aqua durante los cruceros de (a) febrero, (b) abril, (c) julio y (d) octubre de 2011. El rectángulo marca el área de estudio.

the same dates as SST (fig. 12). High chlorophyll *a* values were observed in Apr11 (fig. 13b). In Jul11 (fig. 13c), the highest concentrations ($>6 \text{ mg m}^{-3}$) also occurred in the northern part of the region, to the south of the Gulf of Ulloa. The lowest chlorophyll *a* concentrations of all 2011 occurred in Oct11 (fig. 13d), associated with the strong influence of subtropical waters in the region, described as oligotrophic by Cepeda-Morales *et al.* (2013).

The surface geostrophic current fields (10-day average) for the 2011 sampling periods are shown in figure 14. A relatively dynamic meander was observed in Feb11 (fig. 14a), which approached the study area at a distance of $\sim 150 \text{ km}$ with speeds of $\sim 0.25 \text{ m s}^{-1}$. An anticyclonic eddy was also observed off the Gulf of Ulloa. In Apr11 (fig. 14b), the meander maintained its distance from the coast at the same latitude as MAB, but further south it veered offshore. During both periods, the peripheral area of the current passed sufficiently close to the coast to advect lower salinity CC water, as evidenced by the temperature and salinity distributions (fig. 8). In Jul11 (fig. 14c), the main flow of the CC was weaker and it moved offshore to more than 200 km from the coast, forming

(> 34.5), similar to the signal of the presence of modified subtropical water. Therefore, in summer, in the study area, the zone of transition of the northeastern Pacific, where the subtropical water (warm and salty) and the water of subarctic origin (cold and less salty) converge.

La figura 12 muestra las imágenes semanales compuestas de la temperatura superficial del mar (TSM) obtenidas del sensor MODIS-Aqua para los cruceros en 2011. En Feb11, toda la zona frente a BMA presentó valores de TSM de entre 18 y 19 °C, además de agua más fría ($< 18 \text{ °C}$) en las zonas adyacentes (fig. 12a). La TSM aumentó gradualmente hacia el sur hasta 21 °C. Durante Abr11, la distribución de TSM se caracterizó por la presencia de agua fría en una franja paralela a la costa (fig. 12b), lo cual evidencia eventos de surgencia costera. La temperatura frente a BMA fue de 16 °C, con una extensión hacia fuera de la costa frente a la entrada a bahía Almejas. Hacia el sur, se observó agua más cálida, de 18 a 21 °C y hasta de 23 °C, frente a cabo San Lucas. En Jul11, las isotermas tuvieron una dirección perpendicular a la costa, ascendiendo de 21 °C en el norte y a 28 °C frente a cabo San Lucas (fig. 12c). En Oct11 se observó la presencia

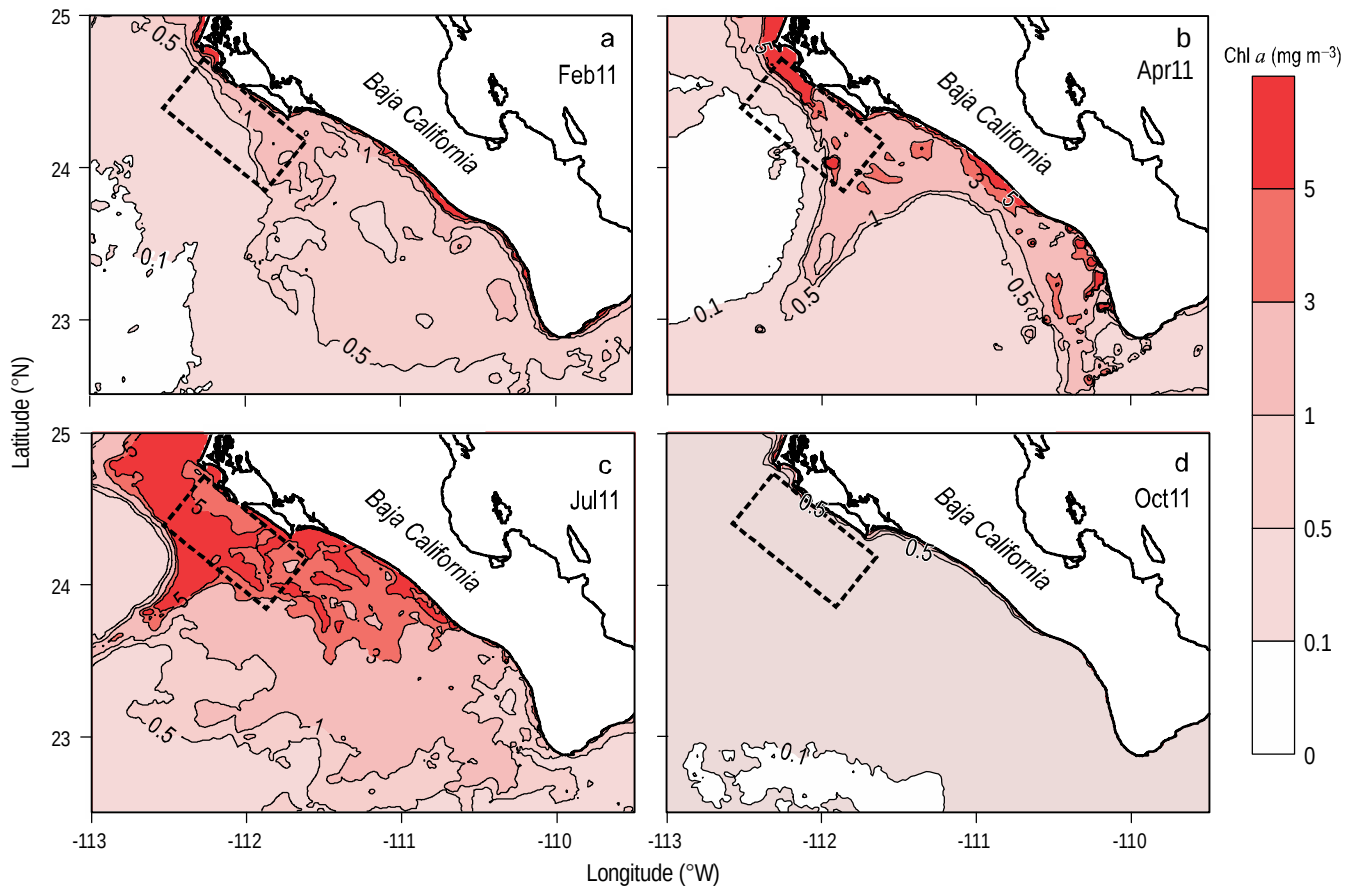


Figure 13. Averaged weekly chlorophyll *a* (Chl *a*) distribution in (a) February, (b) April, (c) July, and (d) October 2011. The rectangle marks the study area.

Figura 13. Distribución de los promedios semanales de clorofila *a* (Chl *a*) en (a) febrero, (b) abril, (c) julio y (d) octubre de 2011. El rectángulo marca el área de estudio.

several mesoscale eddies with different rotational directions. At the same time, there was a slight northward incursion of surface waters from the southern tip of the Baja California Peninsula. In Oct11 (fig. 14d), the effect of the CC diminished and a constant poleward flow was observed along the coastline, passing by MAB to the Gulf of Ulloa. The maximum intensity of this flow was $\sim 0.25 \text{ m s}^{-1}$ near the tip of the peninsula, decreasing to 0.10 m s^{-1} off MAB.

DISCUSSION

The thermohaline structure of the study area is primarily determined by three water masses that can potentially occur off MAB: cold, low salinity SAW; warm, saltier SSW; and, in the deepest part ($> 200 \text{ m}$ depth), ESW. Since the sampling grid is located in the coastal zone of the shelf where intense mixing occurs, the presence of transitional water would be expected as a result of the mixing between SAW and SSW. The presence and impact of these water masses depends on the influence of the CC flow and the hydrodynamic processes occurring over the continental slope and shelf.

de agua cálida en una lengüeta paralela a la costa (fig. 12d), consistente con la presencia de la corriente hacia el polo registrada al norte de esta región por Durazo y Baumgartner (2002).

Las distribuciones espaciales de clorofila *a* (compuestos semanales) construidas a partir de los datos del sensor MODIS-Aqua se muestran en la figura 13 para las mismas fechas que la TSM (fig. 12). En Abr11, se observaron valores elevados de clorofila *a* (fig. 13 b). En Jul11, también se registraron concentraciones altas de clorofila *a* ($> 6 \text{ mg m}^{-3}$) en la parte norte de la región (en el sur del golfo de Ulloa) (fig. 13c). En Oct11, las concentraciones de clorofila *a* fueron las más bajas de todo el año y estuvieron asociadas a la fuerte influencia del agua subtropical en la región (fig. 13d), descrita como oligotrófica por Cepeda-Morales *et al.* (2013).

La figura 14 presenta los campos de las corrientes geostóficas superficiales (promedio de 10 días) para febrero, abril, julio y octubre de 2011. En Feb11, se observó un meandro relativamente dinámico que se acercó al área de estudio a una distancia de $\sim 150 \text{ km}$ y velocidad de $\sim 0.25 \text{ m s}^{-1}$ (fig. 14a). También se observó un remolino anticiclónico

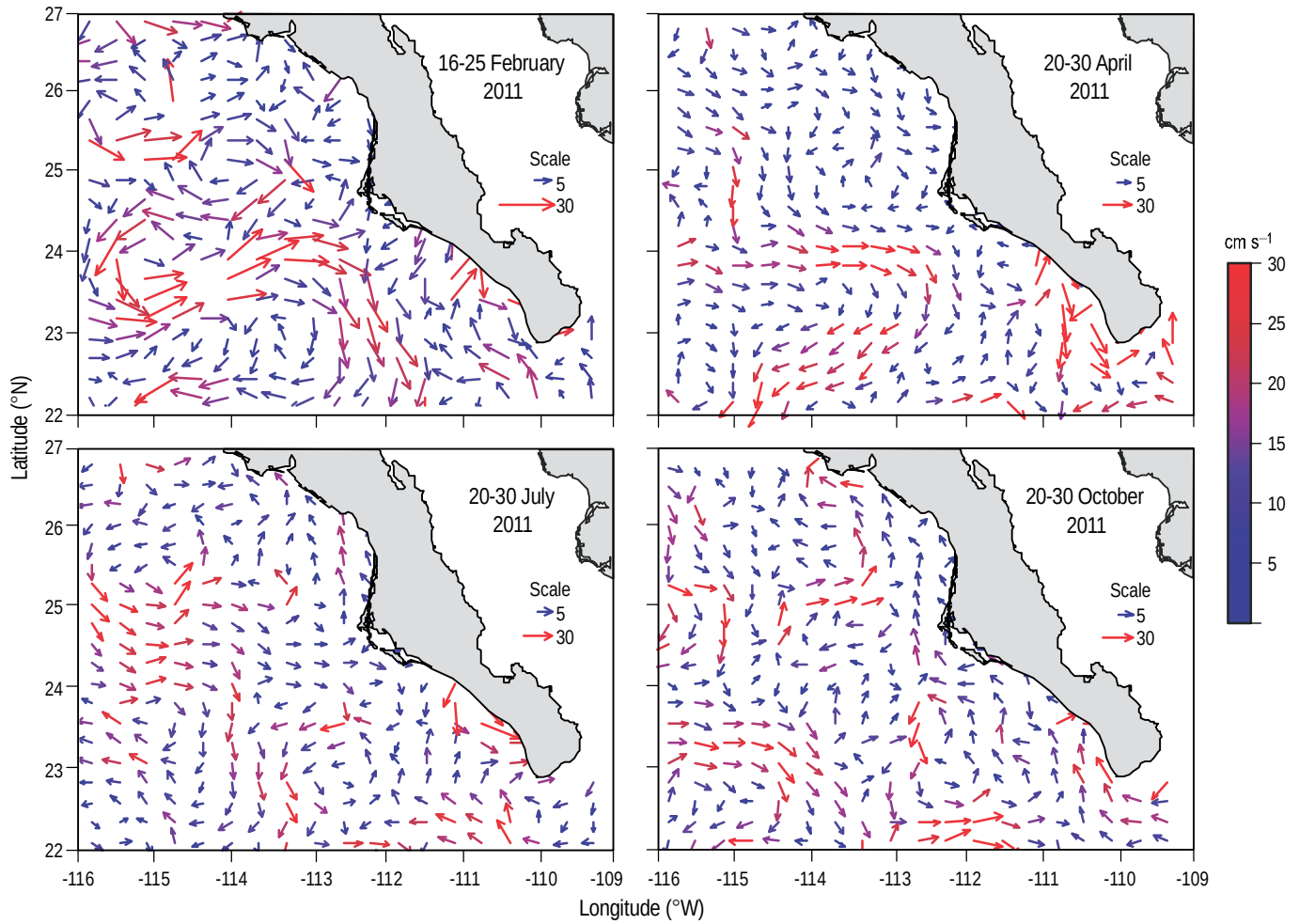


Figure 14. Average geostrophic currents over a 10-day period during the (a) February, (b) April, (c) July, and (d) October 2011 cruises.

Figura 14. Corrientes geostroóficas promedio en un periodo de 10 días durante los cruceros de (a) febrero, (b) abril, (c) julio y (d) octubre de 2011.

The geostrophic currents exhibit marked seasonal variability (fig. 14). In association with this hydrodynamic variability, the corresponding SST distributions display a temporal evolution of the temperate-subtropical thermal interaction during an annual cycle, which can be characterized by a change in the location of the surface thermal front between SAW and SSW (fig. 12). At depths greater than 200 m where ESW occurs, significant seasonal changes in the thermohaline structure were not detected (fig. 9). Over the continental shelf, however, where depths reach 200 m, variations in the position of the thermal front regulate the relation between these water masses and the stratification conditions off MAB.

In winter and spring, the surface thermal front between subarctic and subtropical waters was very pronounced over the continental shelf, with manifestation of cold, upwelled water in the region adjacent to MAB (figs. 4b, f; 11c). To the north and west of the sampling grid, intrusions of low salinity (33.7–33.8) and cooler water (1–2 °C cooler relative to the

frente al golfo de Ulloa. En Abr11, el meandro mantuvo su distancia desde la costa en la latitud de BMA, pero cambió su dirección hacia mar adentro en las localidades más sureñas (fig. 14b). En ambos periodos, la zona periférica de la corriente pasó lo suficientemente cerca de la costa para advectar agua menos salina de la CC, como se evidencia por las distribuciones de las variables termohalinas (fig. 8). En Jul11, el flujo principal de la CC fue más débil y se alejó a más de 200 km de la costa, formando varios remolinos de mesoescala con diferentes direcciones de rotación (fig. 14c). Al mismo tiempo, hubo una escasa penetración de aguas superficiales del extremo sur de la península de Baja California hacia el norte. En Oct11, el efecto de la CC en la región disminuyó y, a lo largo de la costa, se registró un flujo constante dirigido hacia el polo, pasando por la zona de BMA hasta el golfo de Ulloa (fig. 14d). La intensidad máxima ($\sim 0.25 \text{ m s}^{-1}$) de este flujo se registró cerca de la punta de la península y disminuyó hasta a 0.10 m s^{-1} en la latitud frente a BMA.

average value for the study area) were regularly observed, especially between 50 and 100 m depth (figs. 6, 7), characteristic of modified CC water. In this case, salinity was a better indicator of modified CC water because of its greater inertia, since variations in temperature depend on solar heating of the surface and on vertical mixing.

In summer, the temperature and salinity fields in the study area were uniform, with evidence of CC water only at some oceanic stations (figs. 4c, 6c). Warmer and more saline (up to 34.7–34.8) subtropical surface and subsurface waters were observed in the southern part of the shelf. In Oct11, both surface and subsurface (to 100 m depth) shelf waters off MAB were characterized by high temperatures (up to 27.5 °C at the surface, fig. 12d) and high salinity (34.7–34.8), corresponding to SSW. Water salinities below 34.0 were not observed throughout the area. Surface temperatures (fig. 12d) confirm that tropical water from the south occurs along the coast in this area. This finding is in agreement with Durazo-Arvizu (2012), who reported the presence over the continental shelf and slope off the Baja California Peninsula of a subsurface poleward countercurrent, weak and deep in winter and spring and more intense in summer. In autumn, due to the weakening of northwesterly winds, the countercurrent rises to the surface and defines a shallow coastal transport of SSW (fig. 10c), even to the north of MAB. At the coastal stations in the southern part of the study area, warmer (fig. 5a, b) and more saline (fig. 6a, b) water is periodically found. Analysis of the potential temperature and salinity along the 26 σ_t isopycnal surface (fig. 11c, d), which are in a thermohaline balance, reveals positive anomalies (relative to the average values for this isopycnal surface) of 2 °C (13.8 °C) and 0.8 (34.5) at southern coastal stations, indicating the transition of the temperature–salinity isopycnal balance from subarctic to subtropical waters. Hence, in winter and spring, modified subarctic and subtropical waters were present in the study area at the same time.

Since the study area is located far enough from the origin of the CC and the subtropical region, it is difficult to find water types with exclusive characteristics of SAW or ESW. Considering that the intrusion of ESW is not very likely at the depths over the continental shelf (<200 m) and not taking into account the effect of vertical mixing, we evaluated the degree of horizontal mixing of SAW and SSW in the study area in Jul11 and Oct11 (fig. 14). Given that horizontal mixing occurs mainly along isopycnal surfaces, figure 15(a, c) shows the isopycnal mixing plots for Jul11 and Oct11. For the estimations, the 24.5 σ_t (Jul11, fig. 14a) and 24 σ_t (Oct11, fig. 14c) isopycnal surfaces were selected because they have values within the ranges of SAW and SSW. As reference values that characterize the water masses, those obtained for the selected surface were used, corresponding to the mean salinity range for the respective water mass: 33.5 for SAW and 34.7 for SSW (fig. 15a, c). The percentage of mixing was calculated without considering the effect of salinity on the

DISCUSIÓN

La estructura termohalina del área de estudio se establece principalmente por los tres tipos de masas de agua que potencialmente se pueden presentar frente a BMA: AS fría y de baja salinidad, ASS cálida y de mayor salinidad y, en la parte más profunda (>200 m de profundidad), AES. Debido a que la malla muestreada se encuentra en la zona costera de la plataforma con intensos procesos de mezcla, se esperaría la presencia de masas de agua transicionales como resultado de la mezcla de AS y ASS. La presencia y el impacto de estas masas de agua se regulan por la influencia del flujo de la CC y los procesos hidrodinámicos en el talud y la plataforma continental.

Las corrientes geostróficas exhiben una variabilidad estacional pronunciada (fig. 14). En asociación a esta variabilidad hidrodinámica, las distribuciones correspondientes de TSM tienen una evolución temporal de la interacción térmica templada-subtropical durante el ciclo anual, lo cual puede estar caracterizado por un cambio en la localización del frente térmico superficial entre AS y ASS (fig. 12). No se registraron cambios significativos estacionales en la estructura termohalina a profundidades mayores que 200 m, donde se ubica el AES (fig. 9). Sin embargo, sobre la plataforma continental, a profundidades de hasta 200 m, las variaciones en la posición del frente térmico regulan la relación entre estas masas de agua y las condiciones de estratificación frente a BMA.

En invierno y primavera, el frente térmico superficial entre las aguas subárticas y subtropicales en la plataforma continental fue muy pronunciado, con una manifestación de agua fría forzada por las surgencias costeras en la región adyacente a BMA (figs. 4b, f; 11c). Al norte y oeste de la malla de muestreo, se observaron regularmente las intrusiones de agua con menor temperatura (1 a 2 °C menor con respecto al valor promedio en el área de estudio) y baja salinidad (33.7–33.8), especialmente en la capa subsuperficial de 50 a 100 m de profundidad (figs. 6, 7), característico del agua modificada de la CC. En este caso, la salinidad fue un mejor indicador de las aguas modificadas de la CC debido a su mayor inercia, ya que las variaciones en la temperatura dependen del calentamiento solar en la superficie y de la mezcla vertical.

En verano, los campos de temperatura y salinidad en el área de estudio fueron uniformes, con señales de agua de la CC solamente en algunas estaciones alejadas de la costa (figs. 4c, 6c). En la parte sur de la plataforma, se localizaron aguas subtropicales, tanto subsuperficiales como superficiales, con mayor temperatura y salinidad (de hasta 34.7–34.8). En Oct11, el agua sobre la plataforma continental frente a BMA, tanto en la superficie como en la capa subsuperficial hasta 100 m de profundidad, se caracterizó por alta temperatura (hasta 27.5 °C en la superficie, fig. 12d) y alta salinidad (34.7–34.8), características del ASS. En toda el área no se observó agua con salinidad menor que 34.0. La TSM

specific heat capacity of seawater. In Jul11 (fig. 15b), most of the area was occupied by slightly modified subtropical water (>70% of SSW); subarctic water (>70% of SAW) occupied only a few stations along the two northernmost transect lines. In Oct11 (fig. 15d), the influence of subtropical waters decreased and all the central part was occupied by well-mixed water (40–60% of SSW).

Upwelling activity was identified in the density field in all the winter and spring cruises, especially in Apr11, Feb12, and Apr12 (fig. 10). Though the CUI for the area adjacent to MAB is half that recorded at latitudes 28–30° N (Bakun and Nelson 1977, Zaitsev *et al.* 2003), the activity was sufficiently intense to produce outcrops of subsurface water from depths between 60 and 70 m (figs. 9, 11), when maximum pycnocline depth (with a surface mixed layer of 40 m) was observed in Feb12 (fig. 3), allowing the water to be transported to the surface. The SST distributions indicated the presence of cooler water in the vicinity of MAB (fig. 13a, b). Maximum negative SST anomalies (4.5 °C), calculated relative to the mean value for the region, were observed in the area adjacent to MAB in Apr11 (fig. 4b).

Note that in February and April, the possible exchange of water with MAB due to tidal flows across the mouths did not significantly affect the generation of negative temperature anomalies in the adjacent areas (figs. 4a, b??, e, f; 12a, b). Climate data (Sánchez-Montante *et al.* 2007) show that in February, waters inside the lagoon system are slightly cooler (0.7 °C) than the adjacent oceanic surface waters, and the effect is small in comparison to the effect of upwelling on surface temperature in the coastal zone. In April, water temperatures inside the lagoon system are 0.5 °C higher than in the adjacent coastal zone.

Studies of surface temperature and chlorophyll *a* distributions based on satellite data for the CC area (Legaard and Thomas 2006) and coastal zone of the Baja California Peninsula (Espinosa-Carreón *et al.* 2004, 2012) indicate that zones and filaments with high chlorophyll *a* content and, at the same time, low SST are frequently observed in the coastal region of the CC, both associated with the occurrence of coastal upwelling of varying spatiotemporal amplitude. In Apr11, the distribution of SST (fig. 12b) shows two cold-water filaments, one extending 80 km seaward, perpendicular to the coast, and the other, with less thermal contrast, extending along the coast to the southern tip of the peninsula. The distribution of chlorophyll *a* (fig. 13b) showed a similar pattern, indicating a direct effect of upwelling on phytoplankton biomass. The high chlorophyll *a* concentrations recorded in Jul11, however, cannot be entirely associated with local upwelling. They were likely related to the horizontal transport of very small phytoplankton (picoplankton) from the north of the study area, confirmed by the presence in the coastal zone close to the Gulf of Ulloa of modified subarctic water during this period (fig. 15b).

(fig. 12d) confirma que en esta zona se localiza agua tropical proveniente del sur a lo largo de la costa; esto concuerda con Durazo-Arvizu (2012), quien afirma que sobre la plataforma y el talud continental de la península de Baja California existe una contracorriente subsuperficial hacia el polo, débil y profunda en invierno-primavera y más intensa en verano. Durante el otoño, debido al debilitamiento de los vientos provenientes del noroeste, la contracorriente se eleva hacia la superficie y define un transporte costero somero de ASS (fig. 10c), incluso más al norte de BMA. En las estaciones costeras de la zona sur de la plataforma, periódicamente se encuentra agua con mayor temperatura (fig. 5a, b) y salinidad (fig. 6a, b). El análisis de la temperatura potencial y la salinidad en la superficie isopícnica de 26 σ_t (fig. 11c, d), las cuales están en un balance termohalino, muestra las anomalías positivas (con respecto a los valores promedios en esta superficie isopícnica) de 2 °C (13.8 °C) para la temperatura y 0.8 (34.5) para la salinidad en estaciones costeras del sur, lo cual indica la transición del balance isopícnico de temperatura y salinidad de las aguas subárticas a las subtropicales. Por tanto, en invierno y primavera, en el área del estudio, se encontraron al mismo tiempo las aguas modificadas subárticas y subtropicales a diferentes profundidades.

Puesto que el área de estudio está situada lo suficientemente alejada del origen de la CC y de la zona subtropical, es difícil encontrar tipos de agua solamente con las características puntuales de AS o de AES. Tomando en cuenta que en las profundidades sobre la plataforma continental (< 200 m) es poco probable la intrusión del AES y sin considerar el efecto de mezcla vertical, se puede evaluar el grado de mezcla horizontal de AS y ASS en el área de estudio para Jul11 y Oct11 (fig. 14). Dado que la mezcla horizontal se produce principalmente a lo largo de superficies isopícnicas, la figura 15(a, c) muestra los diagramas de mezcla isopícnica para Jul11 y Oct11. Para las estimaciones de mezcla, se seleccionaron las superficies de 24.5 σ_t (Jul11, fig. 14a) y de 24 σ_t (Oct11, fig. 14c) debido a que contienen los valores dentro de los intervalos de AS y ASS. Como valores de referencia que caracterizan a las masas de agua, se eligieron aquellos obtenidos en la superficie seleccionada, correspondientes al intervalo medio de la salinidad para esta masa de agua: 33.5 para AS y 34.7 para ASS (fig. 15a, c). Las estimaciones del porcentaje de mezcla fueron calculadas sin tomar en cuenta el efecto de la salinidad sobre la capacidad calorífica del agua de mar. En Jul11 la mayor parte del área presentó agua subtropical ligeramente modificada (>70% de ASS) (fig. 15b). El agua de origen subártico (>70% de AS) ocupó solamente pocas estaciones en las dos líneas del norte. La influencia de las aguas subtropicales en Oct11 fue menor, y toda la parte central del área estuvo ocupada por agua bien mezclada (40–60% de ASS).

La actividad espacial de las surgencias fue identificada en el campo de densidad en todos los cruceros de invierno y primavera, especialmente en Abr11, Feb12 y Abr12 (fig. 10).

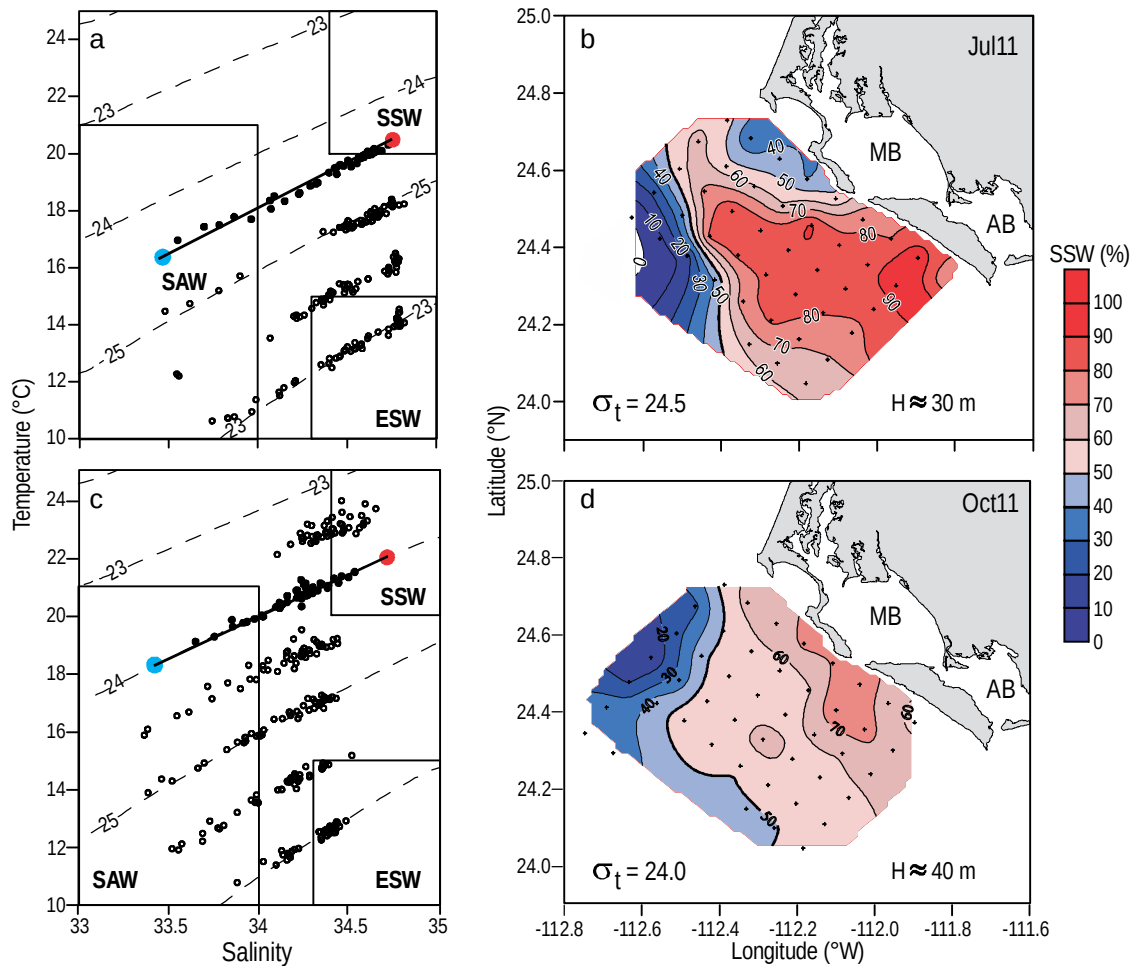


Figure 15. Temperature–salinity diagrams for isopycnal surfaces in (a) July 2011 and (c) October 2011. The blue and red circles on the $24.5 \sigma_t$ (a) and $24 \sigma_t$ (c) isopycnals indicate the reference values for Subarctic Water (SAW) and Subtropical Surface Water (SSW), respectively. The percentage proportions of the volumetric content of SAW and SSW along these surfaces are shown in (b) and (d), respectively. ESW, Equatorial Subsurface Water; MB, Magdalena Bay; AB, Almejas Bay.

Figura 15. Diagramas de temperatura y salinidad para las superficies isopícnicas en (a) julio de 2011 y en (c) octubre de 2011. Los círculos azules y rojos en la isopícnica de $24.5 \sigma_t$ (a) y de $24 \sigma_t$ (c) señalan los valores de referencia para las masas de Agua Subártica (SAW) y Agua Subtropical Superficial (SSW), respectivamente. La proporción porcentual del contenido volumétrico de SAW y SSW en estas superficies se presenta en (b) y en (d), respectivamente. ESW, Agua Ecuatorial Subsuperficial; MB, bahía Magdalena; AB, bahía Almejas

CONCLUSIONS

Based on the results obtained in 2011–2012 and historical data, the following main observations can be made.

- Analysis of the thermohaline structure, SST distribution, and the geostrophic current fields over the continental shelf off MAB reveals two dynamic scenarios: (a) due to the intensification of northwesterly winds in late winter and spring, there is a mean southward transport along the coast between January and June; (b) due to the weakening and change of direction of the wind and main CC flow, in summer and autumn there is a poleward transport of surface and subsurface subtropical water, forming a coastal

Aunque el ISC en la zona adyacente a BMA fue la mitad del que se registró en latitudes a $28\text{--}30^\circ\text{N}$ (Bakun y Nelson 1977, Zaytsev *et al.* 2003), la surgencia fue lo suficientemente intensa para producir afloramientos del agua subsuperficial desde profundidades de entre 60 y 70 m (figs. 9, 11), cuando la mayor profundidad de la piconclina (con capa superficial de mezcla de 40 m) fue observada en Feb12 (fig. 3), lo cual permite el transporte del agua hacia la superficie. Las distribuciones de TSM indican aguas con menor temperatura en las vecindades de BMA (fig. 13a, b). Las anomalías negativas máximas de TSM (4.5°C) calculadas con respecto al valor medio de la región fueron encontradas en la zona adyacente al sistema BMA durante Abr11 (fig. 4b).

countercurrent that reaches at least the southern part of the Gulf of Ulloa.

- The temperature and salinity characteristics in the area adjacent to MAB (30–40 km seaward and up to 200 m depth) frequently show, at the oceanic stations, slightly modified SAW, with salinity of 33.7–33.8 between 50 and 100 m depth, and SSW, with salinity of 34.7 near the coastal zone. Hence, the study area can be considered the southern boundary of the transition zone between subarctic and subtropical waters over the shelf off the Baja California Peninsula.
- The hydrodynamics in the area is mainly governed by coastal upwelling events, especially in summer, which cause subsurface waters to rise to the surface from 70 m depth. The spatial extension of the surface manifestation of coastal upwelling can extend 80 km offshore.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Mexican Ministry of the Environment and Natural Resources and the National Council for Science and Technology (SEMARNAT-CONACYT project No. 2008-C01-107267), by the National Polytechnic Institute (SIP project No. 20131277), and by CICESE. JLC acknowledges receipt of a doctoral scholarship from CONACYT, and OZ, ATC, GGC, and JCM are SNI (Sistema Nacional de Investigadores) stipend recipients. We thank the captain and crew of the R/V *Francisco de Ulloa* for their help during the cruises, and the anonymous reviewers for their valuable comments.

English translation by Christine Harris.

REFERENCES

- Bakun A, Nelson CS. 1977. Climatology of upwelling related processes off Baja California. *CalCOFI Rep.* 19: 107–127.
- Bjorkstedt EP *et al.* 2011. State of the California Current 2010–2011: Regionally variable responses to a strong (but fleeting?) La Niña. *CalCOFI Rep.* 52: 36–68.
- Bjorkstedt EP *et al.* 2012. State of the California Current 2011–2012: Ecosystems respond to local forcing as La Niña wavers and wanes. *CalCOFI Rep.* 53: 41–76.
- Castelao RM, Barth JA. 2006. The relative importance of wind strength and along-shelf bathymetric variations on the separation of a coastal upwelling jet. *J. Phys. Oceanogr.* 36: 412–425.
- Castro-Valdez R, Collins CA, Mascarenhas A, Durazo R, Trasviña Castro A. 2012. Circulación frente a la península de Baja California en el Pacífico y en la entrada al golfo de California. Libro de resúmenes de la reunión anual de la Unión Geofísica Mexicana 2012, p. 147.
- Cepeda-Morales J, Gaxiola-Castro G, Beier E, Godínez VM. 2013. The mechanisms involved in defining the northern boundary of the shallow oxygen minimum zone in the eastern tropical Pacific Ocean off Mexico. *Deep-Sea Res.* 1 76: 1–12.

Cabe señalar que en febrero y abril el posible intercambio de agua con BMA debido a los flujos de marea a través de las bocas no afecta significativamente en la generación de las anomalías negativas de la temperatura en las áreas adyacentes (figs. 4a, b??, e, f; 12a, b). Los datos climáticos (Sánchez-Montante *et al.* 2007) muestran que en febrero, las aguas dentro del complejo lagunar BMA fueron de menor temperatura (0.7 °C) que las aguas superficiales del mar adyacente, lo cual se considera un valor pequeño con relación al efecto en la temperatura superficial producido por las surgencias en la zona costera. En abril, las aguas interiores de BMA presentaron temperaturas 0.5 °C más altas que las de la zona costera adyacente.

Los estudios de distribución superficial de temperatura y clorofila *a* realizados con base en los datos satelitales en la zona de la CC (Legaard y Thomas 2006) y en la zona costera de la península de Baja California (Espinosa-Carreón *et al.* 2004, 2012) indican que en la región costera de la CC frecuentemente se observan zonas y filamentos con alta concentración de clorofila *a* y, al mismo tiempo, baja TSM, ambos asociados a la ocurrencia de surgencias costeras de variable amplitud espaciotemporal. En Abr11 la distribución de TSM (fig. 12b) muestra dos filamentos de agua con baja temperatura, uno dirigido hacia afuera de la costa en forma perpendicular a la línea costera, con una extensión de hasta 80 km, y otro, con menor contraste térmico, que se extendió a lo largo de la costa hacia el extremo sur de la península de Baja California. La distribución de clorofila *a* (fig. 13b) mostró un patrón similar, lo que permite identificar un efecto directo de las surgencias en la biomasa del fitoplancton. Para Jul11, las altas concentraciones de clorofila *a* no pueden ser totalmente asociadas con el fenómeno de surgencia local; posiblemente estuvieron relacionadas con el transporte horizontal de fitoplancton muy pequeño (picoplancton) desde el norte de la zona de estudio, que es confirmado por la presencia de agua subártica modificada en la zona costera cerca del golfo de Ulloa para este periodo (fig. 15b).

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos en 2011–2012 y los datos históricos, se sintetizan las siguientes observaciones principales:

- Los análisis de la estructura termohalina, la distribución de la TSM y los campos de las corrientes geostóficas en la plataforma continental frente al sistema lagunar BMA muestran dos escenarios dinámicos: (a) debido a la intensificación de los vientos del noroeste a finales del invierno y primavera, hay un transporte promedio a lo largo de la costa hacia el sur de enero a junio; (b) debido al debilitamiento y cambio de la dirección del viento y del flujo principal de la CC, en verano y otoño se registró el transporte hacia el polo de agua subtropical subsuperficial y superficial, formando una contracorriente costera que alcanza por lo menos el sur del golfo de Ulloa.

- Cervantes-Duarte R, Prego R, López-López S, Aguirre-Bahena F, Ospina-Alvarez N. 2013. Annual patterns of nutrients and chlorophyll in a subtropical coastal lagoon under the upwelling influence (SW of Baja California Peninsula). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 120: 54–63.
- Durazo R. 2009. Climate and upper ocean variability off Baja California, Mexico: 1997–2008. *Prog. Oceanogr.* 83: 361–368.
- Durazo R, Baumgartner T. 2002. Evolution of oceanographic conditions off Baja California: 1997–1999. *Prog. Oceanogr.* 54: 7–31.
- Durazo R, Gaxiola-Castro G, Lavaniegas B, Castro-Valdez R, Gómez-Valdés J, Mascarenhas Jr A. 2005. Oceanographic conditions west of the Baja California coast, 2002–2003: A weak El Niño and subarctic water enhancement. *Cienc. Mar.* 31: 537–552.
- Durazo R, Ramírez-Manguilar AM, Miranda LE, Soto-Mardones LA. 2010. Climatología de variables hidrográficas. In: Gaxiola-Castro G, Durazo R (eds.), *Dinámica del Ecosistema Pelágico Frente a Baja California 1997–2007*. SEMARNAT, CICESE, UABC, pp. 25–58.
- Durazo-Arvizu R. 2012. Variabilidad estacional de contracorrientes en el sistema de la Corriente de California frente a Baja California. Libro de resúmenes de la reunión anual de la Unión Geofísica Mexicana 2012, p. 145.
- Espinosa-Carreón TL, Strub PT, Beier E, Ocampo-Torres F, Gaxiola-Castro G. 2004. Seasonal and interannual variability of satellite-derived chlorophyll pigment, surface height, and temperature off Baja California. *J. Geophys. Res.* 109: C03039. <http://dx.doi.org/10.1029/2003JC002105>.
- Espinosa-Carreón TL, Gaxiola-Castro G, Beier E, Strub PT, Kurczyn JA. 2012. Effects of mesoscale processes on phytoplankton chlorophyll off Baja California. *J. Geophys. Res.* 117: C04005. <http://dx.doi.org/10.1029/2011JC007604>
- Figuerola D, Moffat C. 2000. On the influence of topography in the induction of coastal upwelling along the Chilean coast. *Geophys. Res. Lett.* 27: 3905–3908.
- Gill AE. 1982. *Atmospheric-Ocean Dynamics*. Academic Press, 664 pp.
- Gómez-Valdés J. 1983. Estructura hidrográfica promedio frente a Baja California Norte. *Cienc. Mar.* 9: 75–86.
- Jerónimo G, Gómez-Valdés J. 2006. Mean temperature and salinity along an isopycnal surface in the upper ocean off Baja California. *Cienc. Mar.* 32: 663–671.
- Kurczyn JA, Beier E, Lavín MF, Chaigneau A. 2012. Mesoscale eddies in the northeastern Pacific tropical-subtropical transition zone: Statistical characterization from satellite altimetry. *J. Geophys. Res.* 117: 1–17.
- Legaard KR, Thomas AC. 2006. Spatial patterns in seasonal and interannual variability of chlorophyll and sea temperature in the California Current. *J. Geophys. Res.* 111: C06032, 21 pp.
- Lynn RJ, Simpson JJ. 1987. The California Current System: The seasonal variability of its physical characteristics. *J. Geophys. Res.* 92: 12947–12966.
- Sánchez-Montante O, Zaitsev O, Saldivar-Reyes M. 2007. Condiciones hidrofísicas en el sistema lagunar Bahía Magdalena-Almejas. In: Funes-Rodríguez R, Gómez-Gutiérrez J, Palomares-García R (eds.), *Estudios Ecológicos en Bahía Magdalena*. CICIMAR-IPN, Baja California Sur, México, pp. 1–28.
- Strub PT, Kosro PM, Huyer A. 1991. The nature of cold filaments in the California Current System. *J. Geophys. Res.* 96: 14743–14768.
- Zaitsev O, Sánchez-Montante O, Robinson CJ. 2007. Características del ambiente hidrofísico en la plataforma continental y zona oceánica adyacente al sistema lagunar de Bahía Magdalena. In: Funes-Rodríguez R, Gómez-Gutiérrez J, Palomares-García R (eds.), *Estudios Ecológicos en Bahía Magdalena*. CICIMAR-IPN, Baja California Sur, México, pp. 29–43.
- Zaytsev O, Cervantes-Duarte R, Sánchez-Montante O, Gallegos A. 2003. Coastal upwelling activity on the Pacific shelf of the Baja California Peninsula. *J. Oceanogr.* 59: 489–502.
- Las características de temperatura y salinidad en la región adyacente al sistema BMA (30–40 km hacia mar adentro y hasta 200 m de profundidad) frecuentemente muestran, en las estaciones alejadas de la costa, el AS ligeramente modificada, con salinidad de 33.7–33.8 en la capa subsuperficial de 50 a 100 m, y el ASS, con salinidad de 34.7, cercana a la zona costera. Esto permite considerar la zona frente a BMA como el inicio del límite sur de la zona de transición entre las aguas subárticas y subtropicales sobre la plataforma continental de la península de Baja California.
 - La hidrodinámica de la zona está principalmente modulada por los eventos de surgencias costeras, particularmente en primavera, los cuales inducen el afloramiento de aguas subsuperficiales desde 70 m de profundidad. La extensión espacial de la manifestación superficial de las surgencias costeras puede alcanzar hasta 80 km mar adentro.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (proyecto SEMARNAT-CONACYT No. 2008-C01-107267), por el Instituto Politécnico Nacional (proyecto SIP No. 20131277) y por el CICESE. JLC recibió una beca de doctorado por parte del CONACYT y OZ, ATC, GGC y JCM recibieron becas del Sistema Nacional de Investigadores (SNI). Agradecemos al capitán y a la tripulación del B/O *Francisco de Ulloa* su ayuda durante los cruceros. Expresamos nuestro agradecimiento a los revisores anónimos por sus observaciones, que nos permitieron mejorar el manuscrito final.

Magdalena. CICIMAR-IPN, Baja California Sur, México, pp. 1–28.

Strub PT, Kosro PM, Huyer A. 1991. The nature of cold filaments in the California Current System. *J. Geophys. Res.* 96: 14743–14768.

Zaitsev O, Sánchez-Montante O, Robinson CJ. 2007. Características del ambiente hidrofísico en la plataforma continental y zona oceánica adyacente al sistema lagunar de Bahía Magdalena. In: Funes-Rodríguez R, Gómez-Gutiérrez J, Palomares-García R (eds.), *Estudios Ecológicos en Bahía Magdalena*. CICIMAR-IPN, Baja California Sur, México, pp. 29–43.

Zaytsev O, Cervantes-Duarte R, Sánchez-Montante O, Gallegos A. 2003. Coastal upwelling activity on the Pacific shelf of the Baja California Peninsula. *J. Oceanogr.* 59: 489–502.

*Received May 2013,
accepted March 2014.*