

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 $25 \sigma_t$) 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

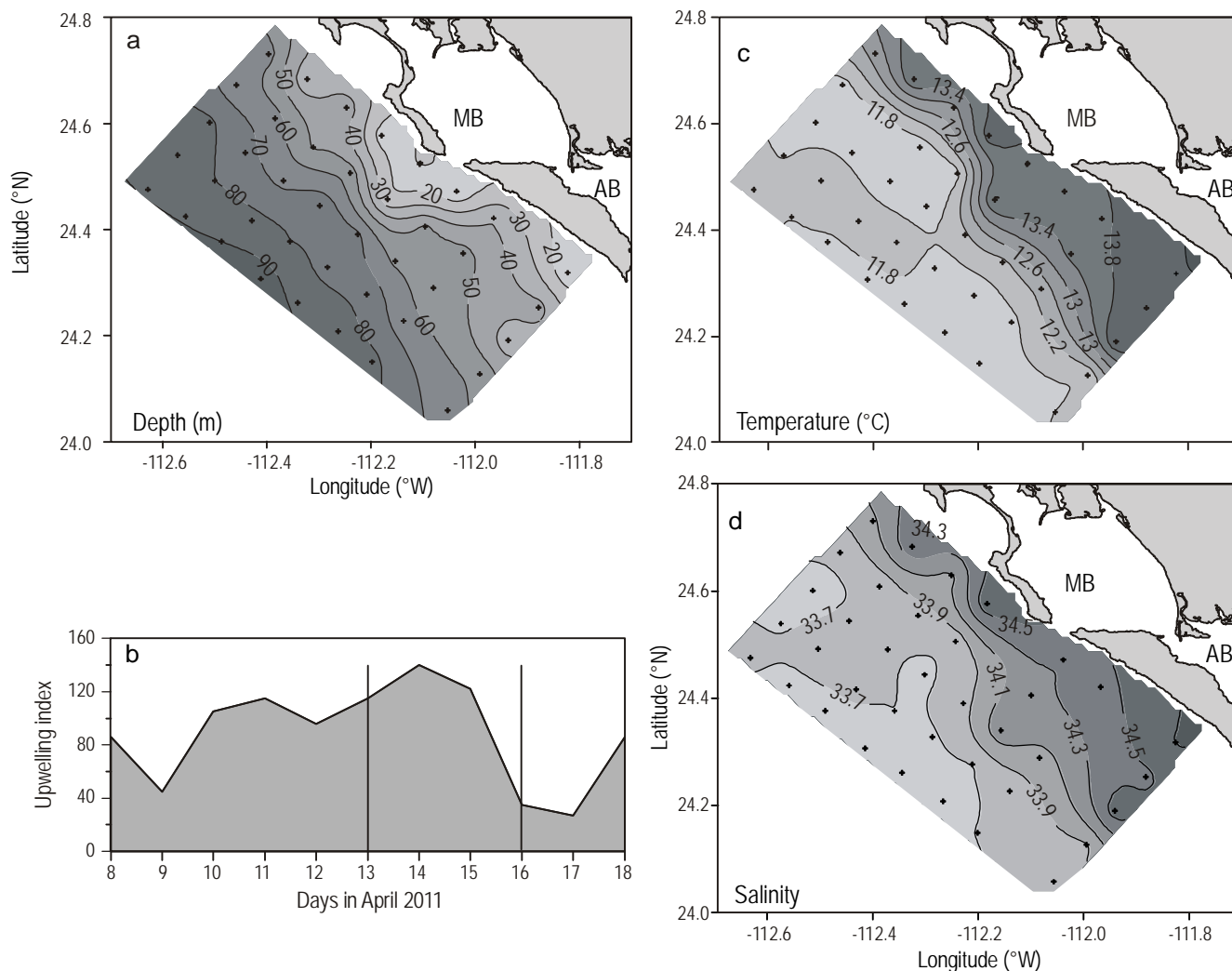


Figure 11. (a) Topography of the 26 kg m⁻³ isopycnal surface in April 2011, (b) Coastal Upwelling Index (m³ s⁻¹ per 100 m of coastline), (c) potential temperature, and (d) salinity on the isopycnal surface.

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

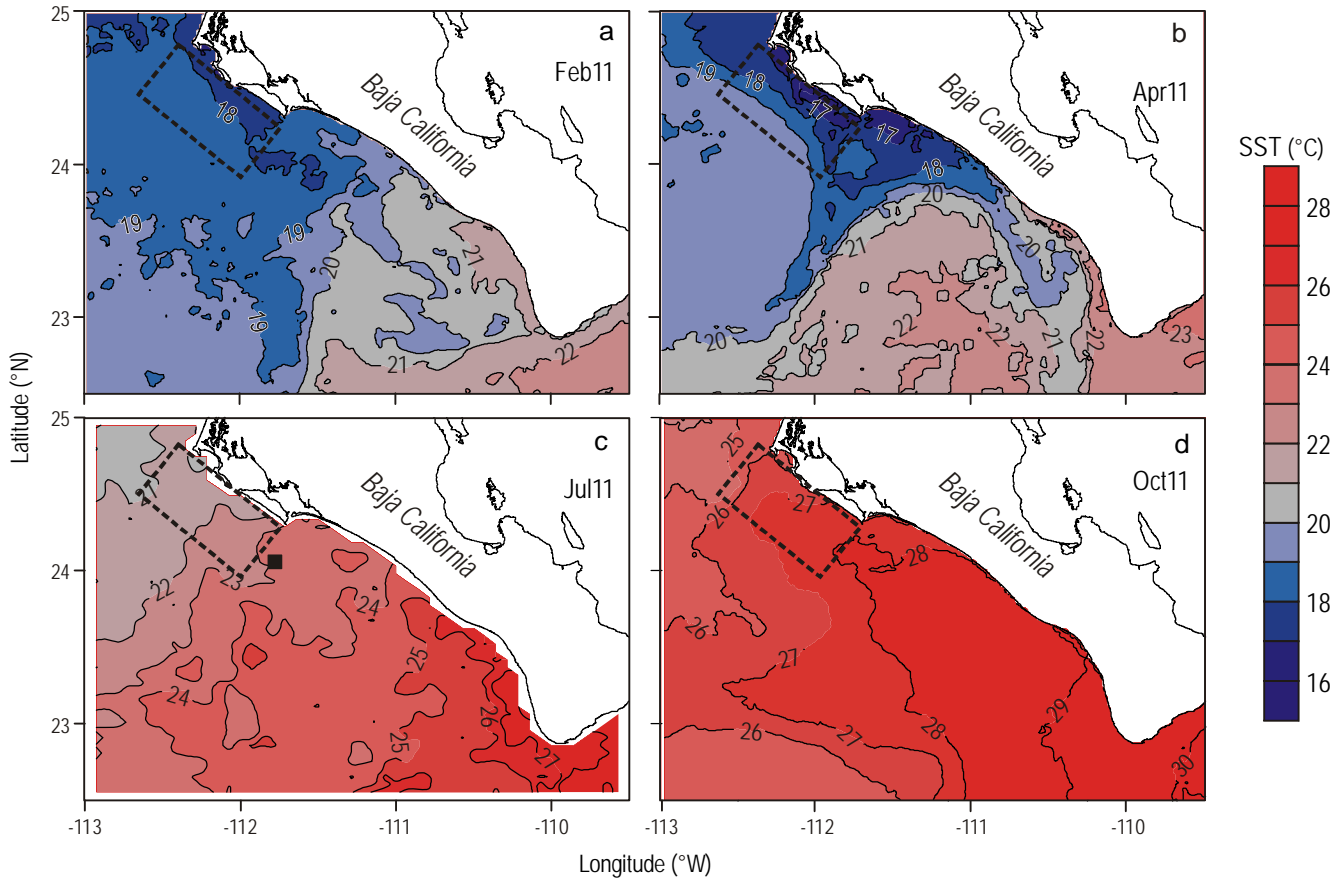


Figure 12. Averaged weekly sea surface temperature (SST) distribution derived from daily MODIS-Aqua images during the (a) February, (b) April, (c) July, and (d) October 2011 cruises. The rectangle marks the study area.

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 modified subtropical water (warm and salty) and the water of subarctic origin (cold and less salty) confluence.

Figure 12 shows the weekly composite images of the sea surface temperature (TSM) obtained from the MODIS-Aqua sensor for the cruises in 2011. In Feb11, the entire zone in front of BMA presented TSM values between 18 and 19 °C, in addition to colder water ($< 18 \text{ °C}$) in the adjacent zones (fig. 12a). The TSM increased gradually southward to 21 °C. During Apr11, the TSM distribution was characterized by the presence of cold water in a band parallel to the coast (fig. 12b), which evidences coastal upwelling events. The temperature in front of BMA was 16 °C, with an extension away from the coast in front of the Almejas bay. To the south, warmer water was observed, from 18 to 21 °C and up to 23 °C, in front of San Lucas cape. In Jul11, the isotherms had a perpendicular direction to the coast, increasing from 21 °C in the north to 28 °C in front of San Lucas cape (fig. 12c). In Oct11, the presence

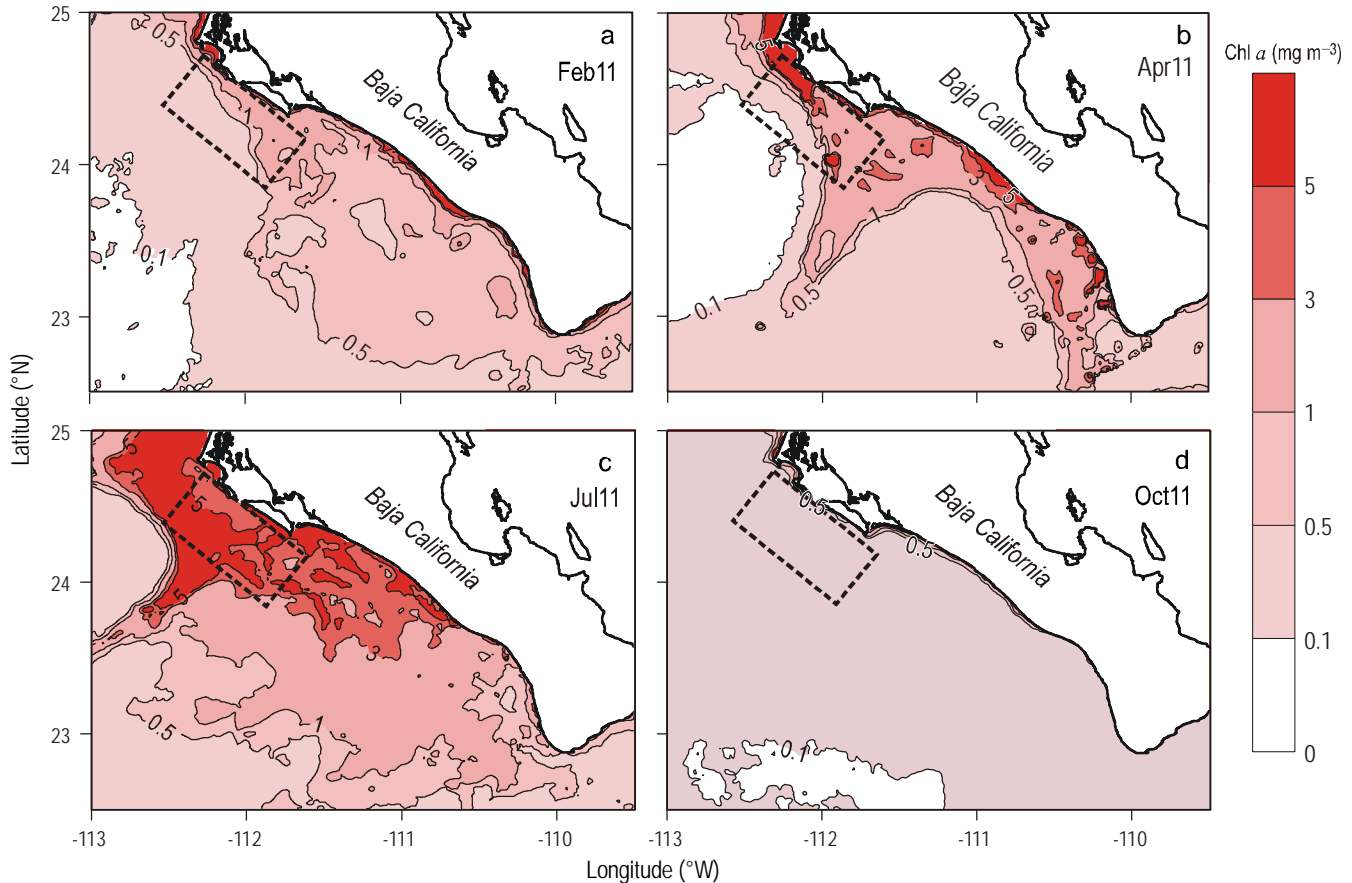


Figure 13. Averaged weekly chlorophyll *a* (Chl *a*) distribution in (a) February, (b) April, (c) July, and (d) October 2011. The rectangle marks the study area.

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

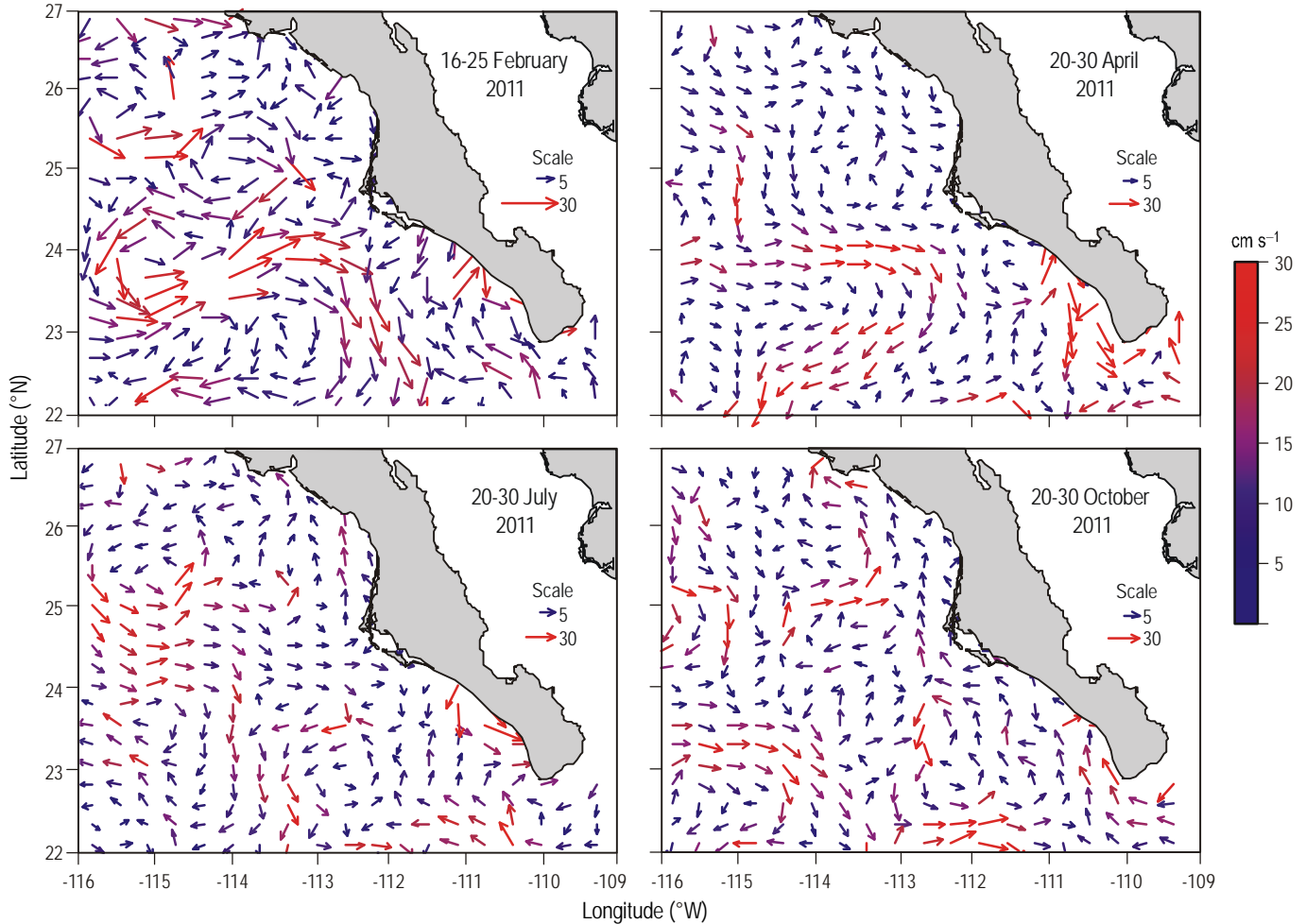


Figure 14. Average geostrophic currents over a 10-day period during the (a) February, (b) April, (c) July, and (d) October 2011 cruises.

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 geostroficadas 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).

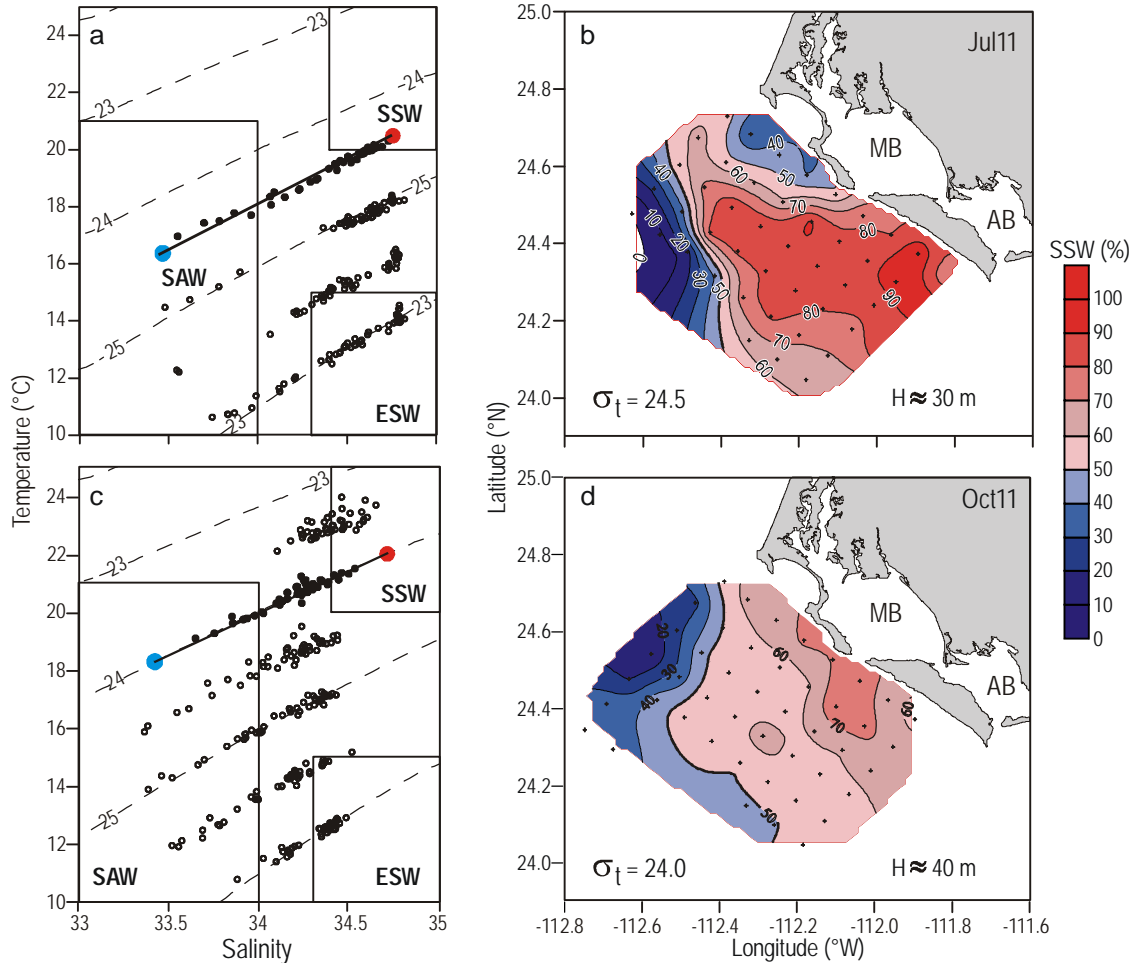


Figure 15. Temperature–salinity diagrams for isopycnal surfaces in (a) July 2011 and (c) October 2011. The blue and red circles on the $24.5 \sigma_t$ (a) and $24 \sigma_t$ (c) isopycnals indicate the reference values for Subarctic Water (SAW) and Subtropical Surface Water (SSW), respectively. The percentage 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>
- Figueroa 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.*