

CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS EN LA ISLA MALPELO Y SU RELACIÓN CON LA CUENCA OCEÁNICA DEL PACÍFICO COLOMBIANO

Efraín Rodríguez-Rubio¹ y Alan Giraldo²

- 1 Dirección General Marítima, Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico, Área de Oceanografía Operacional, Grupo de Estudios Oceanográficos del Fenómeno El Niño. Capitanía de Puerto, San Andrés de Tumaco Nariño, Colombia. erodriguez@dimar.mil.co
- 2 Universidad de Valle, Departamento de Biología, Grupo de Investigación en Ciencias Oceanográficas, A.A. 25360 Cali, Colombia. oceanografia@univalle.edu.co

RESUMEN

La isla Malpelo conforma la ecorregión insular del Pacífico colombiano y contiene un mosaico de ecosistemas terrestres, litorales y submareales únicos. Considerando su carácter insular es de esperar que las características oceanográficas en esta localidad se encuentren influenciadas por la dinámica física y química del Pacífico Oriental Tropical (POT), siendo moduladas por las condiciones propias de la Cuenca Oceánica del Pacífico Colombiano (COPC). En este trabajo, se utilizó información *in situ* para describir las condiciones termohalinas de la columna de agua en la isla Malpelo e identificar las masas de agua dominantes durante los dos períodos hidroclimatológicos característicos de la COPC. Adicionalmente, se analizó la variabilidad térmica y halina en el COPC y se definió el campo de circulación geostrófico superficial a partir de información oceanográfica *in situ* durante los mismos períodos de tiempo con el propósito de evaluar su efecto sobre las condiciones oceanográficas en el ambiente pelágico de la isla Malpelo.

PALABRAS CLAVES: Oceanografía, Masas de agua, Pacífico Oriental Tropical, Isla Malpelo, Colombia.

ABSTRACT

Oceanographic conditions in Malpelo Island and its relationship with the Colombian Pacific Oceanic Basin. Malpelo Island forms the insular ecoregion of the Colombian Pacific, and is composed by a mosaic of terrestrial ecosystems, and unique coastal and shallow subtidal systems. Considering its insular nature, the oceanographic features of this locality are expected to be related with the physical and chemical dynamics of the Eastern Tropical Pacific (ETP) and be modulated by the regional dynamic of the Colombian Pacific Oceanic Basin (COPC in Spanish). In this work, *in situ* data was used to describe the thermohaline conditions in the water column in Malpelo Island and identify key water mass during the two contrasting hydro-meteorological periods of the COPC. Furthermore, we analyzed the thermal and haline variability in the COPC and defined the surface geostrophic flow from *in situ* oceanographic data during the same time in order to evaluate its effect on the oceanographic conditions in the pelagic environment off Malpelo Island.

KEYWORDS: Oceanography, Water mass, Eastern Tropical Pacific, Malpelo Island, Colombia.

INTRODUCCIÓN

La isla Malpelo es el punto insular más occidental en el Océano Pacífico de la República de Colombia. Esta isla que se localiza a $4^{\circ}00'08''$ N y $81^{\circ}36'31''$ W en la zona central de la Cuenca del Océano Pacífico Colombiano (COPC) (Figura 1), es un ascenso de la cordillera o dorsal submarina de Malpelo que se extiende en dirección noreste-suroeste con una longitud de 240 km, un ancho de 80 km y se levanta desde unos 4000 m de profundidad (Lonsdale y Klitgord, 1978). Este sistema orográfico es el resultado de la interacción ocurrida hace más de 20 millones de años entre el “*hot spot*” de Galápagos y el centro de acreción Coco-Nazca, interacción que generó una alta actividad volcánica que originó la isla Malpelo (DeMets *et al.*, 1990; Detrick *et al.*, 2002; Sallarés *et al.*, 2003).

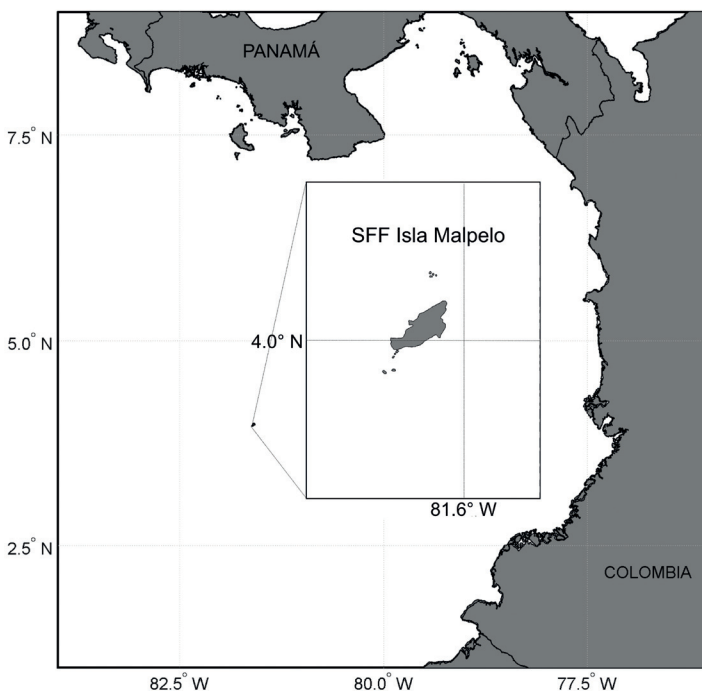


Figura 1. Ubicación de la isla Malpelo en el Pacífico colombiano.

Por su carácter insular oceánico, Malpelo conforma una de las cinco ecorregiones naturales del Pacífico colombiano (Díaz y Gómez, 2000), conteniendo un mosaico de ecosistemas terrestres, litorales y submareales únicos que albergan especies terrestres y marinas endémicas, además de promover el desarrollo de una

amplia variedad de vida marina (Prahl, 1990; Zapata y Vargas-Ángel, 2003). Estas características particulares dieron sustento a la designación de Malpelo y un área marina circundante como Santuario de Fauna y Flora (SFF) en 1995, teniendo actualmente una extensión de 6540 km² (Mayor *et al.*, 2007). Además de ser parte integral del Sistema Nacional Ambiental (SINA), Malpelo constituye, junto con las islas Galápagos, de Coco, de Coiba y Gorgona el corredor marino de conservación del Pacífico Oriental Tropical (POT). Sin embargo, el conocimiento sobre la variabilidad y dinámica de las condiciones oceanográficas locales es aún escaso.

Considerando la posición geográfica de Malpelo, es de esperar que las características oceanográficas en esta localidad se encuentren influenciadas por la dinámica física y química del POT, siendo moduladas por las condiciones propias de la COPC. En este sentido, diferentes autores han destacado que la información disponible sobre la dinámica física (patrón de circulación), procesos químicos (efecto de la zona de mínimo oxígeno) y variabilidad biológica (productividad y flujo de carbono) en el sector oriental del POT (zona que incluye la COPC y Malpelo) es reducida o fragmentada (Amador *et al.*, 2006; Fernández-Alamo y Farber-Lorda, 2006; Fiedler y Talley, 2006; Kessler, 2006; Pennington *et al.*, 2006; Lizano, 2008). En términos generales, esfuerzos puntuales de investigación en el COPC han identificado a la oscilación estacional de los vientos alisios como el principal forzante atmosférico, que modula el patrón de circulación de mesoescala y productividad regional (Rodríguez-Rubio y Stuardo, 2002; Rodríguez-Rubio *et al.*, 2003; Devis-Morales *et al.*, 2008).

Es importante mencionar que la estructura, estabilidad y resiliencia de las comunidades marinas que se desarrollan en una localidad están estrechamente relacionadas con la variabilidad propia del entorno, debido a la estrecha dependencia de la totalidad de los procesos biológicos y químicos con la dinámica física en los sistemas marinos (Parsons *et al.*, 1984; Valiela, 1995; Hughs *et al.*, 2005; Mann y Lazier, 2006). Esta consideración es aún más relevante para un ambiente insular oceánico como Malpelo, en donde los procesos físicos que ocurren en el ambiente pelágico son los que estructuran la red trófica marina local, trama que simultáneamente proporciona la energía requerida para que el sistema terrestre se mantenga (Polis y Hurd, 1996; Polis *et al.*, 1997; Anderson y Polis, 1998; López-Victoria *et al.*, 2009).

En el presente trabajo se analizan los registros de temperatura y salinidad y se identifican las masas de agua en el ambiente pelágico del SFF Malpelo durante dos períodos climáticos contrastantes. Adicionalmente, se describe la variabilidad espacial y temporal de la temperatura y la salinidad en la COPC, y se establece el campo superficial de circulación geostrófica a partir de los registros *in situ* de las campañas Pacífico XLIV-ERFEN XLI y Pacífico PACIFICO XLV-ERFEN XLII [lideradas por la Dirección General Marítima (DIMAR) y el Centro de Investigaciones

Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP)] con el propósito de valorar su efecto sobre las condiciones ambientales del sistema pelágico en esta localidad. Con este análisis se pretende aportar información relevante y necesaria sobre la variabilidad estacional general de la condición oceanográfica en el área de Malpelo, información que es requerida para fortalecer el plan de manejo ambiental de esta área marina protegida e identificar las líneas futuras de investigación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de este trabajo se utilizó información proveniente de dos mallas de muestreo oceanográfico, la malla Malpelo y la malla COPC, que fueron cubiertas durante febrero 2007 y septiembre de 2007 a bordo de los buques de investigación oceanográfica ARC Malpelo y ARC Providencia de la Dirección General Marítima (DIMAR). La malla Malpelo estuvo conformada por 12 estaciones de muestreo, distribuidas alrededor de la isla Malpelo tomando como referencia los 4°N y 81.6°W (Figura 2). La malla COPC estuvo conformada por 43 estaciones de muestreo distribuidas espacialmente en toda la cuenca del Océano Pacífico colombiano (Figura 2).

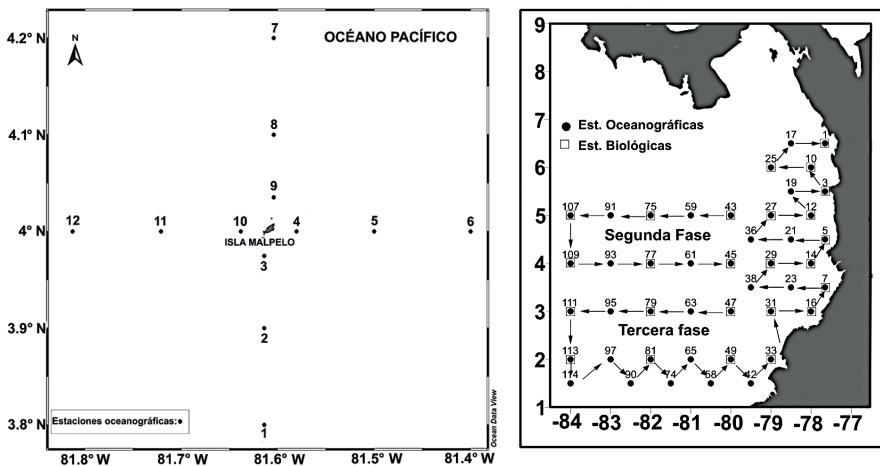


Figura 2. Estaciones oceanográficas establecidas en la cuenca pacífica colombiana y el SFF Malpelo.

En las 12 estaciones de la malla Malpelo se realizó el registro de la temperatura y la salinidad en la columna de agua (0-1500 m) utilizando un perfilador CTD Seabird y se registró la temperatura superficial del mar (TSM) directamente con un termómetro de cazoleta. Se describió la variación espacial y temporal de la temperatura y la salinidad en Malpelo mediante el análisis de secciones verticales

de la columna de agua a partir de la información que se obtuvo en las estaciones de muestreo sobre el trayecto de 4° N. Para construir las secciones verticales se utilizó la técnica de interpolación objetiva, definiendo las distancias óptimas de interpolación con base en el análisis de los variogramas y correlogramas específicos. Adicionalmente se construyeron diagramas de temperatura y salinidad (diagramas TS) para identificar las masas de agua presentes en Malpelo durante cada uno de los periodos de estudio.

Para evaluar el efecto de los forzantes de escala regional sobre las condiciones oceanográficas locales en Malpelo durante cada período de estudio, se describieron los patrones de variación espacial de la temperatura, la salinidad, la topografía dinámica y el campo de viento utilizando los registros de las estaciones de la malla CPOC. El procesamiento y cálculo de las variables derivadas de los perfiles de CTD y su visualización espacial se realizó utilizando rutinas específicas de MATLAB, DATOBJETIVO (Gomis y Ruiz, 2003) y ODV (Ocean Data View; Schlitzer, 2010). El promedio mensual del campo de viento regional que afectó la zona de estudio durante cada uno de los muestreos fue derivado a partir de la base de datos del sensor QuikScat y se estableció el patrón general de circulación geostrofica superficial en la COPC mediante la interpolación objetiva de los campos de temperatura, salinidad, densidad y altura dinámica derivados de la malla COPC, utilizando la aproximación metodológica descrita en Gomis y Ruiz (2003). En términos generales esta metodología define la altura dinámica total a partir de la contribución de los niveles inferiores consecutivos, estableciendo el nivel de referencia como la profundidad inmediatamente posterior a la profundidad de interés. Para esta investigación se definió la profundidad de referencia como la isobata de 500 m.

RESULTADOS

Variación estacional de las condiciones oceanográficas en Malpelo

El patrón de estratificación térmica y salina de la columna de agua en la isla Malpelo siguió la tendencia típica que ha sido descrita para ambientes tropicales. En términos generales se identificó durante los dos períodos de estudio el desarrollo de una termoclina (isoterma de 21 °C) y haloclina (isohalina de 34) entre 30 a 35 m de profundidad (Figuras 3 y 4). Sin embargo, a comienzo del año cuando predominó el efecto de los vientos alisios del norte en la COPC (Figura 5), la isoterma de 15 °C alcanzó su posición más somera (70 m) en contraste con el segundo semestre del año (septiembre 2007) en el que esta misma isoterma se ubicó a más de 125 m de profundidad (Figura 4). Es importante destacar que la salinidad en el estrato superficial de la columna de agua (0-25 m) fue homogénea durante febrero de

2007 con registros de 33, mientras que durante septiembre de 2007 la salinidad en este mismo estrato de la columna de agua fue variable, con registros entre 31 y 33 (Figura 4), probablemente como consecuencia del incremento estacional de la precipitación en la COPC durante el segundo semestre del año.

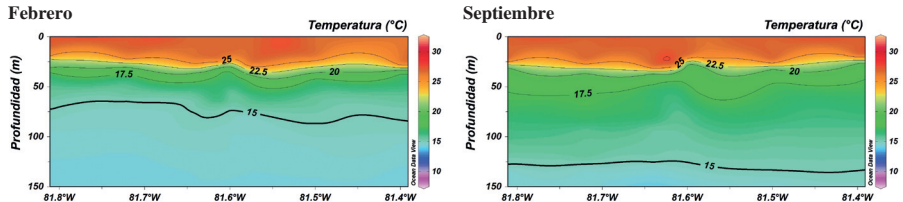


Figura 3. Distribución vertical de la temperatura en el ambiente pelágico de la isla Malpelo durante febrero de 2007 y septiembre de 2007.

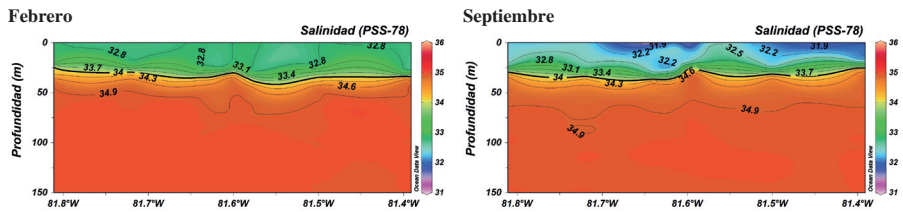


Figura 4. Distribución vertical de la salinidad en el ambiente pelágico de la isla Malpelo durante febrero de 2007 y septiembre de 2007.

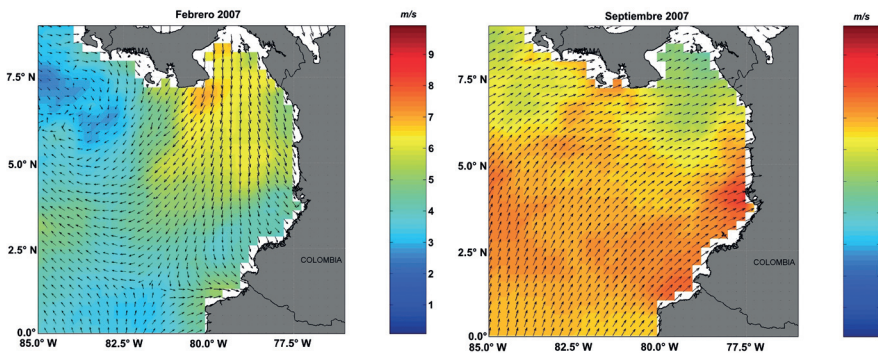


Figura 5. Campo de viento superficial en la cuenca pacífica colombiana, durante febrero de 2007 y septiembre de 2007.

Se identificaron tres masas de agua en la isla Malpelo durante el período de estudio (Figura 6). El Agua Tropical Superficial (ATS: $T > 25^{\circ}\text{C}$, $S < 34$) masa de agua típica del norte del ecuador que se distribuye entre la superficie y los 100 m de profundidad, el Agua Superficial Ecuatorial (ASE: $T < 25^{\circ}\text{C}$, $S > 34$) masa de

agua que se localiza a lo largo de la zona ecuatorial cuyo origen es el proceso de surgencia oceánica, y el Agua Subsuperficial Subtropical (ASSST: $19 < T < 25$ °C; $34.6 < S < 35.4$) la cual se encontró entre 100 y 115 m de profundidad, probablemente como resultado del Agua Central del Pacífico que aflora en la zona ecuatorial.

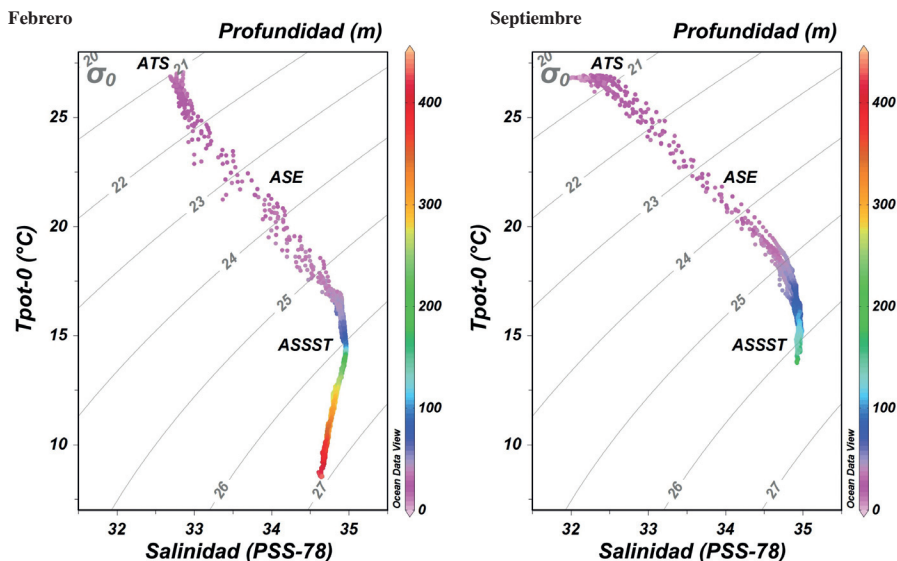


Figura 6. Masas de agua superficiales (hasta 200 m) en la isla Malpelo, durante febrero de 2007 y septiembre de 2007. ATS: Agua Tropical Superficial, ASE: Agua Superficial Ecuatorial, ASSST: Agua Subsuperficial Sub-Tropical.

Circulación geostrófica en la COPC y su influencia sobre Malpelo

Durante febrero de 2007 se desarrolló en la COPC una celda ciclónica con diámetro cercano a 220 km y centrada a 3° N-79° W (Figura 7). El borde oriental de este giro conformó la Corriente Colombia (CCOL), que fluyó hacia el norte, a 110 km de la línea de costa. Del borde norte de la celda se desprendió un flujo de deriva hacia el suroeste que se desplazó sobre los 4° N. La velocidad máxima registrada durante este período fue de 197 cm s^{-1} en el sector sureste, siendo la velocidad superficial promedio de 59 cm s^{-1} (Figura 7). En el área de Malpelo la corriente superficial fluyó hacia el suroeste durante este período, como consecuencia del retorno del giro ciclónico que se desarrolló en la COPC asociado al efecto del chorro de viento de Panamá sobre la superficie de la columna de agua (Figuras 5 y 7).

Durante septiembre de 2007 la estructura del campo de circulación superficial en la COPC fue más compleja (Figura 7). En términos generales se identificaron tres celdas de circulación, una en el sector oriental de la cuenca de

tipo anticiclónica con centro en 4.0° N-79° W y diámetro de 220 km, una en el sector intermedio de la cuenca de tipo ciclónico con centro en 3°45' N-80°15' W y diámetro de 120 km, y una celda en el sector occidental de la cuenca de tipo ciclónico con centro en 3°45' N-81°45' W y diámetro de 100 km (Figura 7). En estos giros se registraron velocidades superiores a 50 cm s⁻¹, predominando en la zona central de la cuenca (80° W) la circulación hacia el norte. La velocidad máxima registrada fue de 186 cm s⁻¹ en el sector central y suroccidental de la cuenca, siendo la velocidad superficial promedio de 54 cm s⁻¹. Durante este periodo el campo de circulación en la zona de Malpelo estuvo influenciado por la interacción del borde occidental de la celda de circulación central y el borde oriental de la celda de circulación del sector occidental de la cuenca, dando como resultado una dirección neta de circulación hacia el Sur (Figura 7).

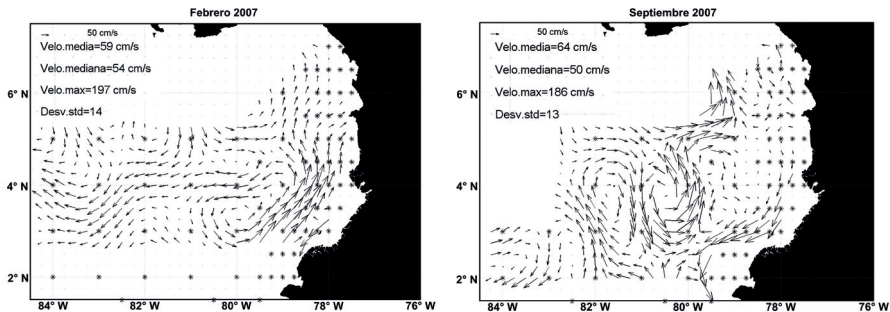


Figura 7. Corrientes geostroficas en la cuenca pacifica colombiana, durante febrero de 2007 y septiembre de 2007.

Condiciones termohalinas en la COPC

Durante febrero de 2007 se registró un enfriamiento generalizado en la COPC, con un núcleo de baja temperatura (<26.5 °C) a 4° N-80° W, localizado en el área de influencia de Malpelo. En el costado noroccidental de la COPC se registraron los valores más altos de temperatura, como resultado del sistema de circulación ciclónica. La temperatura superficial del mar en la COPC durante este período estuvo entre 25.3 y 30.0 °C, siendo el registro promedio de 27.7 °C (Figura 8). La mayor salinidad se registró en el sector suroccidental, identificándose una lengua de agua salina hacia la zona central de la COPC que alcanzó el área de influencia de Malpelo. El menor registro de salinidad fue 26.6 en la zona costera, mientras que el máximo fue de 33.7 en la zona oceánica suroccidental, siendo el promedio de 31.8 (Figura 8).

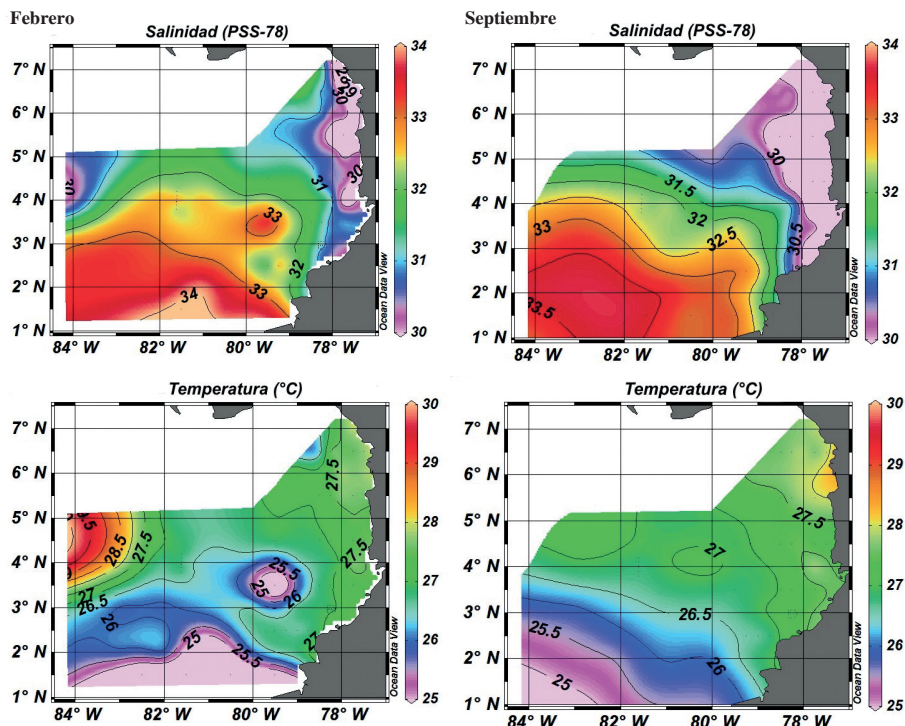


Figura 8. Variación espacial de la temperatura superficial del mar y la salinidad en la cuenca Pacífica colombiana, durante febrero de 2007 y septiembre de 2007.

En septiembre de 2007 la temperatura superficial promedio fue de 26.7 °C registrándose un núcleo de baja temperatura (<26 °C) en el sector suroeste de la cuenca (Figura 8). Este núcleo probablemente esté asociado con la influencia de un giro ciclónico cuyo extremo norte afecta las condiciones térmicas y salinas de la COPC (Figura 7). En contraste, las condiciones térmicas superficiales en el sector central y oriental de la cuenca fueron homogéneas, con registros mayores a 27 °C (Figura 8). Los mayores registros de salinidad superficial durante este período fueron en el sector suroeste de la cuenca (>33) y los menores en el sector noreste de la cuenca (<31) (Figura 8).

La profundidad de la capa de mezcla durante febrero de 2007 en la COPC estuvo entre 10 m (sector central) y 30 m (sector este y sector oeste) (Figura 9) asociándose su variación espacial con la dinámica del Chorro de viento de Panamá y su rotor (Figura 7). Esta condición provocó el desarrollo de una surgencia oceánica debida al bombeo de Ekman, consolidándose un domo térmico con base somera en la zona de influencia de Malpelo (Figura 9). Durante septiembre de 2007 la capa de

mezcla estuvo más profunda, especialmente en el borde sur de la COPC, con registros mayores a 35 m. Sin embargo, en el sector noroccidental de la COPC se registró un ascenso en la profundidad de la capa de mezcla (ca. 20 m), como consecuencia de la influencia de un sistema de circulación ciclónico que se desarrolló en este sector, y que estuvo asociado con un sistema de vientos del suroeste (Figuras 6 y 9).

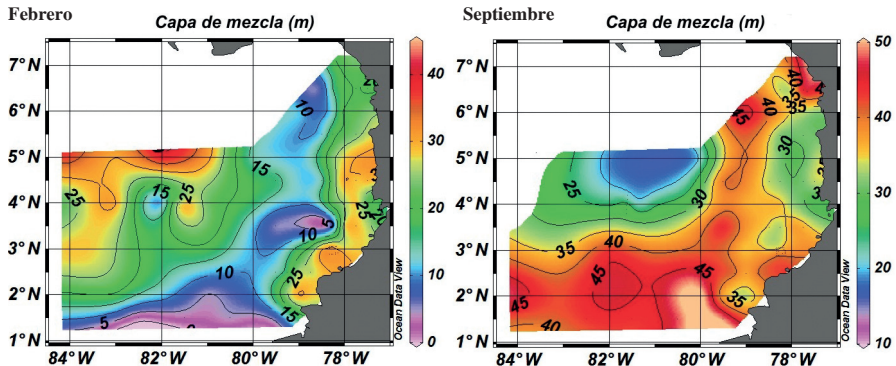


Figura 9. Corrientes geostróficas en la cuenca pacífica colombiana, durante febrero 2007 y septiembre 2007.

DISCUSIÓN

Las condiciones oceanográficas en el sector oriental del POT son altamente dinámicas en una escala anual. Durante el primer trimestre del año, el chorro de viento de Panamá genera una respuesta oceánica en forma de una lengua de agua fría que se origina en el golfo de Panamá y que atraviesa toda la COPC. El resto del año, el campo de viento es dominado por los vientos alisios del sur lo que limita el desarrollo de surgencia oceánica (Kessler, 2006; Pennington *et al.*, 2006). Esta variabilidad estacional define un patrón de circulación superficial particular en la COPC, que se caracteriza por la presencia de un giro ciclónico durante el primer trimestre del año y por el desarrollo, durante el dominio de los alisios del suroeste, de un giro anticiclónico en el sector este de la cuenca y un giro ciclónico en el sector oeste de la cuenca (Devis-Morales *et al.*, 2008).

El patrón de circulación superficial descrito para la COPC en este trabajo constituye un elemento clave en la dinámica oceanográfica de la región y de Malpelo. Durante el primer trimestre del año, el bombeo de Ekman resultante del efecto rotor del chorro de viento de Panamá favorece el ingreso de agua subsuperficial a la zona fótica de la COPC (Rodríguez-Rubio y Stuardo, 2002). Esta agua, generalmente tiene un alto contenido de nutrientes, lo que provoca un incremento en la productividad primaria local de la columna de agua (Barber y Smith, 1981; Rodríguez-Rubio y Stuardo, 2002; Pennington *et al.*, 2006).

Además del efecto de la variación de mesoescala atmosférica (oscilación de los vientos alisios) sobre el ambiente pelágico en Malpelo, no puede descartarse el “efecto de masa de isla” como elemento crucial en la dinámica oceanográfica local. El término “efecto de masa de isla” fue utilizado por Doty y Oguri (1956), para referirse al incremento en la biomasa y productividad que se registra alrededor de zonas insulares oceánicas de manera permanente, que se refleja incluso en una alta disponibilidad de recursos pesqueros en estas localidades (Gilmartin y Revelante, 1974; FAO, 1981; Aristegui *et al.*, 1997; Coutisa y Middleton, 2002).

Desde el punto de vista teórico, es claro que la presencia de una isla en medio de un campo de flujo definido provocará la generación de giros en el sector “protegido” (Hogg, 1972; Baines y Davies, 1980; Gordon y Hughes, 1981; Boyer y Davies, 1982). En el hemisferio norte estos giros locales tienden a incrementar la productividad de dos formas: por retención de partículas en zonas aledañas a las islas cuando son giros anticiclónicos, o por ingreso de nutrientes subsuperficiales a la zona fótica de la columna de agua cuando son giros ciclónicos (Pattiaratchi *et al.*, 1986; Wolanski y Hamner, 1988; Heywood *et al.*, 1990; Aristegui *et al.*, 1994; Aristegui *et al.*, 1997; Rodríguez *et al.*, 2001; Willet *et al.*, 2006). Esta condición ha sido recurrentemente registrada en islas oceánicas de diferente tamaño, como el archipiélago de Hawaii (Wyrtki y Kilonsky, 1984; Falkowski *et al.*, 1991; Flament, 1994), las islas Canarias (Hernández-Guerra, 1993; Aristegui *et al.*, 1997), e incluso en pequeños atolones en el Océano Índico (Heywood *et al.*, 1990), por lo que es razonable pensar que un mecanismo similar podría estar sucediendo en Malpelo durante la época en que no se registra la influencia de la surgencia de Panamá.

En conclusión, la alta riqueza faunística que se registra en el ambiente pelágico de Malpelo (Prahl, 1990; Mayor *et al.*, 2007) probablemente es el resultado del efecto permanente de diferentes procesos físicos, tanto locales como regionales, que simultáneamente influyen esta localidad. Por lo tanto, no es prudente considerar la localidad como un sistema oceanográfico aislado. Por el contrario, para lograr un adecuado entendimiento de los diferentes procesos que modulan el componente biológico marino de Malpelo es necesario incorporar la dinámica de procesos hidroclimatológicos de mesoescala en el análisis. Entre estos procesos se destacan la migración estacional de la Zona de Convergencia Intertropical y el efecto del chorro de viento de Panamá, procesos que modulan el patrón de circulación oceánico superficial y el desarrollo de surgencia estacional. Además de estos procesos de mesoescala, procesos locales como remolinos por el “efecto de masa de isla” deberán ser evaluados de manera específica, al igual que la respuesta del componente biológico local al ingreso de aguas de surgencia.

AGRADECIMIENTOS

A Bellineth Valencia por su contribución y su análisis crítico a una primera versión de este manuscrito. Este trabajo fue financiado por la Dirección General Marítima (DIMAR) y el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCC), en el marco de los proyectos de investigación: “Ampliación de conceptos en la cuenca pacífica colombiana”, “Caracterización oceanográfica físico-química de la Corriente Colombia”, y “Dinámica superficial y subsuperficial de las áreas insulares de COPC”, desarrollados por el área de Oceanografía Operacional del CCCC.

BIBLIOGRAFÍA

- Amador, J. A., E. J. Alfaro, O. G. Lizano y V. O. Magaña. 2006. Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: a review. *Progr. Oceanogr.*, 69 (2-4): 101-142.
- Anderson, W. B. y G. A. Polis. 1998. Marine subsidies of island communities in the Gulf of California: evidence from stable carbon and nitrogen isotopes. *Oikos*, 81 (1): 75-80.
- Aristegui, J., P. Sangra, S. Hemindez-Leon, M. Canton, A. Hernández-Guerra y J. L. Kerling. 1994. Island induced eddies in the Canary Islands. *Deep-Sea Res. PT I*, 41: 1509-1525.
- Aristegui, J., P. Tett, A. Hernández-Guerra, G. Basterretxea, F. Montero, K. Wild, P. Sangra, S. Hernández-León, M. Canton, J. A. García-Braun, M. Pacheco y D. Barton. 1997. The influence of island-generated eddies on chlorophyll distribution: a study of mesoscale variation around Gran Canaria. *Deep-Sea Res. PT I*, 44 (1): 71-96.
- Baines, P. G. y P. A. Davies. 1980. Laboratory studies of topographic effects in rotating and/or stratified fluids. 233-299. En: Hide, R. y P. White. (Eds.). *Orographic effects in planetary flows*. GARP Publ. Ser., 23, WMO, Génova. 450 p.
- Barber, R. y R. Smith. 1981. Coastal upwelling ecosystems. 31-68. En: Longhurst, A. (Ed.). *Analysis of marine ecosystems*. Academic Press, Nueva York. 741 p.
- Boyer, D. L. y P. A. Davies. 1982. Flow past a circular cylinder on a f/l plane. *Philos T R Soc. S-A*, 306: 533-556.
- Coutisa, P. F. y J. H. Middleton. 2002. The physical and biological impact of a small island wake in the deep ocean. *Deep-Sea Res. PT I*, 49: 1341-1361.
- DeMets, C., R. G. Gordon, D. F. Argus y S. Stein. 1990. Current plate motions. *Geophys J. Int.*, 101: 425-478.
- Detrick, R. S., J. M. Sinton, G. Ito, J. P. Canales, M. Behn, T. Blacic, B. Cushman, J. E. Dixon, D. W. Graham y J. J. Mahoney. 2002. Correlated geophysical, geochemical, and volcanological manifestations of plumeridge interaction along the Galápagos Spreading Center. *Geochem. Geophys. Geosy.*, 3 (10): 8501. doi:10.1029/2002GC000350.
- Devis-Morales, A., W. Schneider, R. A. Montoya-Sánchez y E. Rodríguez-Rubio. 2008. Monsoon-like winds reverse oceanic circulation in the Panama Bight. *Geophys. Res. Lett.*, 35: L20607. doi:10.1029/2008GL035172.

- Díaz, J. y D. Gómez. 2000. Programa nacional de investigación en biodiversidad marina y costera. INVEMAR-FONADE-MMA, Santa Marta. 83 p.
- Doty, M. S. y M. Oguri. 1956. The island mass effect. *J. Conseil.*, 22: 33-37.
- Falkowski, P. G., D. Ziemman, Z. Kolber y P. K. Bienfang. 1991. Role of eddy pumping in enhancing primary production in the ocean. *Nature*, 352: 55-58.
- FAO. 1981. Report of the Committee for Development and Management of Fisheries in the Southwest Indian Ocean. FAO Fish 254, Le Chaland, Islas Mauricio. 65 p.
- Fernández-Alamo, M. A. y J. Farber-Lorda. 2006. Zooplankton and the oceanography of the eastern tropical Pacific: a review. *Prog. Oceanogr.*, 69 (2-4): 318-359.
- Fiedler, P. C. y L. D. Talley. 2006. Hydrography of the eastern tropical Pacific: a review. *Progr. Oceanogr.*, 69 (2-4): 143-180.
- Flament, P. 1994. Wind-driven oceanic processes in the lee of the island of Hawaii. *Ann., Geophys.*, 12 (2): C268.
- Gilmartin, M. y N. Revelante. 1974. The island mass effect on the phytoplankton and primary production of the Hawaiian Islands. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 16: 181-204.
- Gomis, D. y S. Ruiz. 2003. Manual DATOBJETIVO v.01: Una herramienta para el análisis espacial objetivo y diagnóstico de variables oceanográficas. Departamento Recursos Naturales, Grupo de Oceanografía Interdisciplinar IMEDEA (centro mixto Universitat de les Illes Balears - CSIC), Mallorca, España. 40 p.
- Gordon, H. B. y R. L. Hughes. 1981. A study of rotating baroclinic nonlinear flow around an island. *J. Phys. Oceanogr.*, 11: 1011-1014.
- Hernández-Guerra, A., J. Aristegui, M. Canton y L. Nykjaer. 1993. Phytoplankton pigment patterns in the Canary Islands as determined using Coastal Zone Colour Scanner data. *Int. J. Remote Sens.*, 14: 1431-1437.
- Heywood, K. J., E. D. Bartonl y J. H. Simpson. 1990. The effects of flow disturbance by an oceanic island. *J. Mar. Res.*, 48: 55-73.
- Hogg, N. G. 1972. Steady flow past an island with application to Bermuda. *Geophys. Fluid Dyn.*, 4: 55-81.
- Hughes, T. P., D. R. Bellwood, C. Folke, R. S. Steneck y J. Wilson. 2005. New paradigms for supporting the resilience of marine ecosystems. *Trends Ecol. Evol.*, 20 (7): 380-386.
- Kessler, W. S. 2006. The circulation of the eastern tropical Pacific: a review. *Progr. Oceanogr.*, 69 (2-4): 181-217.
- Lizano, O. M. 2008. Dinámica de las aguas alrededor de la isla del Coco, Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.*, 56 (Supl. 2): 31-48.
- Lonsdale, P., y K. D. Klitgord. 1978. Structure and tectonic history of the eastern Panama Basin. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 89: 981-999.
- López-Victoria, M. V. Wolters y B. Werding. 2009. Nazca Booby (*Sula granti*) inputs maintain the terrestrial food web of Malpelo Island. *J. Ornithol.*, 150 (4): 865-870.
- Mann, K. H. y J. R. N. Lazier. 2006. Dynamics of marine ecosystems: biological-physical interactions in the oceans. Tercera Edición, Blackwell Publishing, Malden, Estados Unidos. 499 p.

- Mayor, G., C. Acevedo y S. Bessudo. 2007. Generalidades. 15-28. En: DIMAR-CCCP y UAESPNN-DTSO (Eds.). Santuario de Fauna y Flora Malpelo: Descubrimiento en marcha, DIMAR, Bogotá. 142 p.
- Parsons, T. R., M. Takahashi y B. Hargrave. 1984. Biological oceanographic processes. Tercera edición, Butterworth-Heinemann press, Oxford. 344 p.
- Pattiaratchi, C., A. James y M. Collins. 1986. Island wakes and headland eddies: a comparison between remotely sensed data and laboratory experiments. *J. Geophys. Res.*, 92: 783-794.
- Pennington, J. T., K. L. Mahoney, V. S. Kuwahara, D. D. Kolber, R. Calienes y F. P. Chavez. 2006. Primary production in the eastern tropical Pacific: a review. *Progr. Oceanogr.*, 69 (2-4): 285-317.
- Polis, G. A. y S. D. Hurd. 1996. Linking marine and terrestrial food webs: allochthonous input from ocean supports high secondary productivity in small islands and coastal land communities. *Am. Nat.*, 147 (3): 396-423.
- Polis, G. A., W. B. Anderson y R. B. Holt. 1997. Toward an integration of landscape and food web ecology: the dynamics of spatially subsidized food webs. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 28: 289-316.
- Prahl, H. von. 1990. Malpelo la roca viviente. Fondo FEN Colombia, Bogotá. 57 p.
- Rodríguez, J. M., E. D. Barton, L. Eve y S. Hernández-León. 2001. Mesozooplankton and ichthyoplankton distribution around Gran Canaria, an oceanic island in the NE Atlantic. *Deep-Sea Res. PT I*, 48: 2161-2183.
- Rodríguez-Rubio, E., y J. Stuardo. 2002. Variability of photosynthetic pigments in the Colombian Pacific Ocean and its relationship with the wind field using ADEOS-I data. *P. Indian Acad. Sci. (Earth Planet Sci.)*, 111 (3): 227-236.
- Rodríguez-Rubio, E., W. Schneider y R. Abarca del Río. 2003. On the seasonal circulation within the Panama Bight derived by satellite observations of wind altimetry and sea surface temperature. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (7): 1410, doi:10.1029/2002GL016794.
- Sallarés, V. P. Charvis, E. R. Flueh y J. Bialas. 2003. Seismic structure of Cocos and Malpelo volcanic ridges and implications for hot spot-ridge interaction. *J. Geophys. Res.*, 108 (b12): 2564. doi:10.1029/2003jb002431.
- Schlitzer, R. 2010. Ocean Data View user's guide. Alfred Wegener Institute, Bremerhaven, Alemania. 150 p.
- Valiela, I. 1995. Marine ecological processes. Segunda Edición, Springer, Nueva York. 686 p.
- Willett, C. S., R. Leben y M. F. Lavín. 2006. Eddies and mesoscale processes in the eastern tropical Pacific: a review. *Progr. Oceanogr.*, 69 (2-4): 218-238.
- Wolanski, E. y W. Hamner. 1988. Topographically controlled fronts in the ocean and their biological influence. *Science*, 241: 177-181.
- Wyrski, K. y B. Kilonsky. 1984. Mean water and current structure during the Hawaii-Tahiti Shuttle Experiment. *J. Phys. Oceanogr.*, 14: 242-254.
- Zapata, F. A. y B. Vargas-Ángel. 2003. Coral and coral reefs of the Pacific coast of Colombia. 419-447. En: Cortés, J. (Ed.). *Latin American coral reefs*. Elsevier, Ámsterdam. 497 p.

FECHA DE RECEPCIÓN: 09/11/2010

FECHA DE ACEPTACIÓN: 12/10/2011