



## VARIABILIDAD ESPACIAL DEL AFLORAMIENTO EN EL GOLFO DE PANAMÁ

Luis M. Gonzalez<sup>1</sup> y Luis D' Croz<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Instituto del Canal de Panamá, Universidad de Panamá, Estafeta Universitaria, Panamá; mreal9@yahoo.es

<sup>2</sup> Departamento de Biología Marina y Limnología, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Universidad de Panamá

<sup>3</sup> Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales, Apdo. 0843-03092, Panamá; e-mail:dcrozl@si.edu

### RESUMEN

Aunque es bien conocida la variación estacional del patrón termohalino en el Golfo de Panamá, la distribución espacial de éstas características es prácticamente desconocida. En vista de ello, hemos utilizado la Base de Datos Oceanográficos del Océano Mundial (WOD01) para describir la variabilidad de la estructura termohalina en el Golfo de Panamá durante la temporada lluviosa y en la temporada seca cuando ocurre el fenómeno de afloramiento. Se seleccionaron los datos correspondientes a dos cruceros oceanográficos que presentan la mayor densidad en sitios de recolecta de muestras durante noviembre de 1967 (temporada lluviosa) y marzo de 1933 (temporada seca). Se utilizó el paquete de programas Ocean Data View para leer la información en WOD01, formar una colección de datos y efectuar el análisis de los perfiles oceanográficos. Los resultados indican que la distribución de la temperatura superficial del mar en el Golfo de Panamá es significativamente diferente entre la temporada lluviosa y la temporada seca (Prueba-z = 24,  $p < 0.01$ ). Durante la temporada lluviosa, las condiciones superficiales son bastantes homogéneas con temperaturas cálidas ( $> 27.5$  °C) y salinidad diluida ( $< 31$  psu), por efecto de las lluvias. Durante la temporada seca el agua superficial es más fría ( $< 21$  °C) y más salina ( $> 34$  psu). En la sección transversal promedio del golfo, la termoclina (definida como la isoterma de 20 °C), se hunde hacia el lado Oeste y por el contrario, prácticamente rompe en la superficie en el lado Este del golfo, donde el afloramiento es más intenso.

### PALABRAS CLAVES

Termoclina, vientos, afloramiento, transporte de Ekman, WOD01, América Central.

## ABSTRACT

While the seasonal variability of water properties in the Gulf of Panama is relatively well known, processes which rule the spatial variability are poorly understood. In view of this, we aimed to study the spatial variability of the termohaline structure of the gulf during the dry season upwelling and the rainy season using available archived data from the World Ocean Data Base (WOD01). For the selection of the data base we considered the results from two oceanographic cruises with the largest number of sampling sites. The selected cruises were carried in November 1967 (rainy season) and in March 1933 (dry season). We used the software packages from Ocean Data View to access the WOD01, built a data base, and draw the oceanographic profiles. Results have confirmed significant sea surface temperature differences between the rainy and the dry seasons ( $z$ -test = 24,  $p < 0.01$ ). Warm sea surface temperature (SST > 27.5° C) and low salinity (< 31 psu) waters were commonplace during the rainy season. Colder (SST < 21° C) and more saline (> 34 psu) waters were the norm during the dry season. The mean hydrographic profile from the along-shelf transect during the dry season, showed the thermocline to be tilted toward the West side of the gulf; whereas the thermocline nearly breaks in the surface in the East side, where upwelling is more intense.

## KEYWORDS

Thermocline, winds, upwelling, Ekman transport, WOD01, Pacific Central America.

## INTRODUCCION

Las costas del Pacífico de la América Central y Panamá están expuestas a procesos derivados de la interacción atmósfera-océano que resultan en importantes gradientes oceanográficos. La región se encuentra bajo la influencia de una zona de baja presión y vientos ascendentes llamada Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), donde convergen los vientos alisios del noreste y sureste (Xie *et al.*, 2005, Amador *et al.*, 2006). A la ZCIT se asocian intensas y frecuentes lluvias por lo que su posición define el clima centroamericano. La ZCIT se posa sobre Panamá desde mayo hasta diciembre que es el período cuando se desarrolla la temporada lluviosa. Desde enero hasta principios de abril la ZCIT se encuentra al Sur del istmo y acontece la temporada seca. Durante este período, un sistema atmosférico de alta presión en el Caribe y Golfo de México desarrolla un patrón de vientos que cruzan el istmo centroamericano en dirección al Pacífico. Se forman surtidores de viento en las secciones de la cordillera donde hay depresiones topográficas, como es el caso en

(México), en el área de los lagos de Nicaragua y en la parte central del Istmo de Panamá, donde se construyó el canal. Estos surgidores son particularmente intensos durante la temporada seca (el invierno boreal) y desplazan las aguas costeras superficiales hacia el mar abierto dando lugar a procesos de afloramiento en los golfos de Tehuantepec, Papagayo (Costa Rica) y Panamá (Fiedler & Talley, 2006). Los vientos también originan un afloramiento oceánico (en aguas profundas), conocido como el Domo Térmico de Costa Rica (Kessler, 2002). El proceso de afloramiento causa el ascenso de la termoclina y de aguas profundas, frías y ricas en nutrientes que favorecen el crecimiento del fitoplancton que sostiene abundantes recursos pesqueros centroamericanos (Fiedler, 2002).

En la Figura 1 se representa la plataforma continental del Pacífico de Panamá. Dicha plataforma se divide en el Golfo de Panamá (área de 27,175 km<sup>2</sup>) y el Golfo de Chiriquí (área de 13,119 km<sup>2</sup>). En el Golfo de Panamá el afloramiento se desarrolla entre febrero y marzo, cuando los vientos alisios del norte son más intensos (Smayda, 1966, Forsbergh, 1969, Kwiecinski *et al.* 1975, Kwiecinski & Chial, 1983). Durante este período ocurre el descenso en el nivel de mar en la costa y la temperatura superficial decrece en hasta 10 °C. El afloramiento es la razón de la gran productividad biológica del Golfo de Panamá (D’Croz *et al.*, 1991). En abril, con la atenuación de los vientos, la superficie del mar vuelve a tornarse cálida y la concentración de nutrientes se empobrece, condición que se mantiene durante toda la temporada lluviosa (D’Croz & Robertson, 1997, D’Croz & O’Dea, 2007).

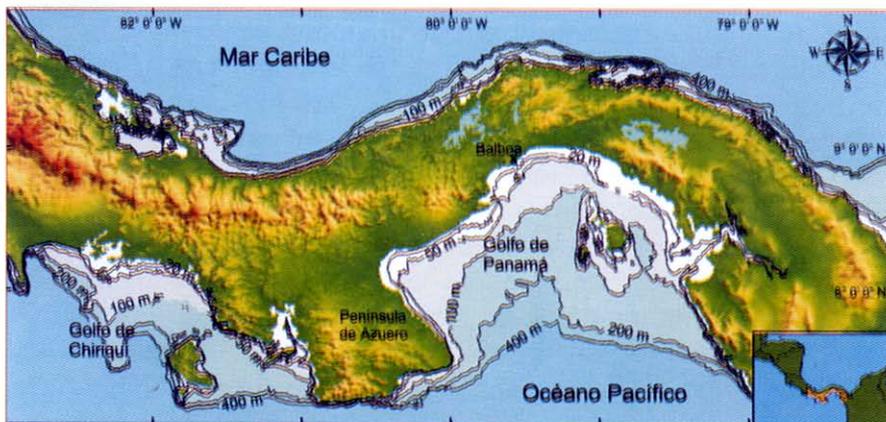


Fig. 1. Mapa de la República de Panamá, mostrando el Golfo de Panamá. En el inserto se aprecia la ubicación regional.

A pesar de la importancia que tiene el afloramiento para la ecología y pesquerías en el Golfo de Panamá, la variabilidad espacial del evento oceanográfico ha sido escasamente descrita (Forsbergh, 1969, Kwiecinski et al., 1975), debido a la limitada cobertura geográfica de las investigaciones realizadas. Sin embargo, hoy día, con el establecimiento de la Base de Datos Oceanográficos del Océano Mundial 2001, conocida como WOD01 (Conkright et al., 2002), es posible realizar investigaciones con amplia cobertura geográfica a partir de la información contenida en este archivo. Esta base está disponible en: <http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD01/>. En el presente trabajo hacemos un análisis de las condiciones oceanográficas que caracterizan al Golfo de Panamá durante el afloramiento.

## **METODOLOGÍA**

Los datos hidrográficos utilizados en este trabajo son un subconjunto para las aguas territoriales panameñas de la información disponible en la Base de Datos Oceanográficos del Océano Mundial 2001. Se utilizaron archivos de temperatura (en °C) y la salinidad (en psu) señalados como de buena calidad y actualizados hasta marzo de 2006. Se escogió la información de dos cruceros, uno correspondiente a la temporada lluviosa y otro a la temporada seca, que presentan la mayor densidad en sitios de recolecta de muestras. Para la temporada lluviosa, se escogieron los datos de un crucero que recolectó información en 24 estaciones neríticas someras y profundas, entre el 14 y 18 de noviembre de 1967 (Fig. 2a). Se recolectaron muestras de agua hasta la profundidad en la que se encontró temperatura de 20° C considerada como el centro de la profundidad de la termoclina estacional en el Pacífico oriental tropical (Fiedler et al., 1991, Kessler, 2002). Los datos para la temporada seca corresponden a un crucero realizado entre el 9 al 17 y del 21 al 24 de marzo de 1933, en el que se muestrearon 86 estaciones dentro del golfo (Fig. 2b). En cada estación se hicieron lances con botella colectora desde la superficie hasta el fondo. De esta manera, se obtuvieron perfiles de temperatura y salinidad a varios niveles en la columna de agua. Utilizamos el paquete de programas Ocean Data View (Schlitzer, 2002), para leer los datos de WOD01, formar un archivo y efectuar el análisis de los perfiles oceanográficos.

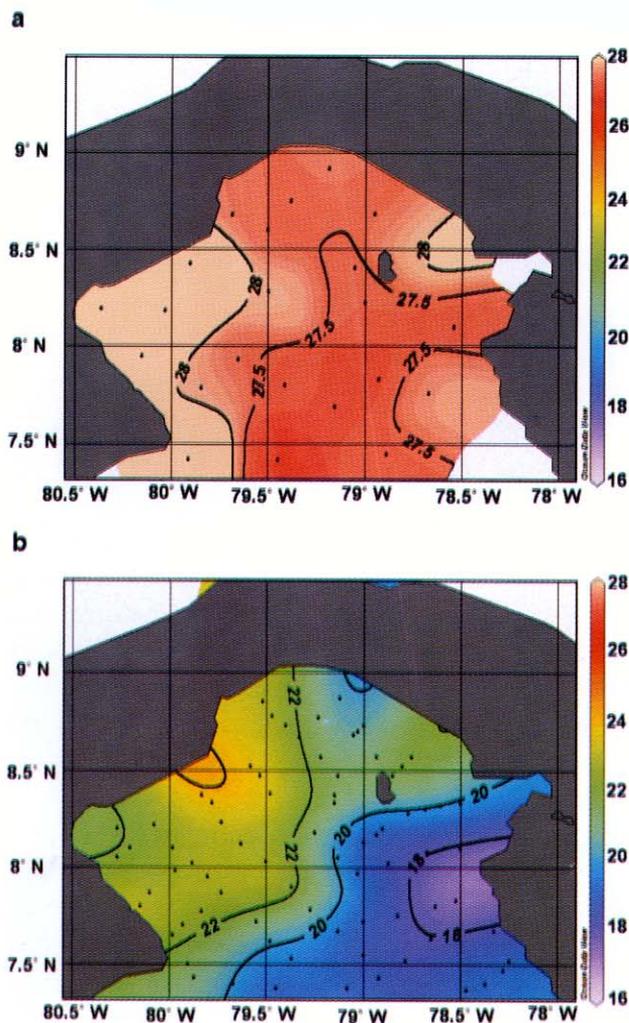


Fig. 2. Distribución de la temperatura superficial del mar ( $^{\circ}$  C), en el Golfo de Panamá. a. Durante la temporada lluviosa (noviembre 1967). b. Durante el afloramiento, estación seca (marzo 1933). Los puntos negros indican los sitios de recolecta de muestras de agua.

Como velocidad del viento se han considerado los promedios mensuales de la velocidad del viento del Norte calculados a partir de un registro de 51 años (1915-1965), medidos en el Canal de Panamá, en la estación meteorológica localizada en Balboa, Ciudad de Panamá. Se utilizó el programa Surfer 8 (<http://www.goldensoftware.com/>), para formar una cuadrícula, interpolar y graficar los datos de viento

medidos en las estaciones hidrográficas realizadas en el cruce durante marzo de 1933. Como índice del esfuerzo del viento sobre las aguas del golfo utilizamos la relación:  $\tau = \rho C_D U^2$ . En esta ecuación  $\rho = 1.3 \text{ kg m}^{-3}$  es la densidad del aire,  $U$  es la velocidad del viento ( $\text{m s}^{-1}$ ) y  $C_D$  es un coeficiente de arrastre ( $C_D = 0.001$  en el caso presente).

## RESULTADOS Y DISCUSION

### *Temperatura superficial del mar y los vientos.*

Las temperaturas superficiales cálidas son típicas en la temporada lluviosa (mayo a diciembre) en el Golfo de Panamá y esta condición se mantiene hasta el final de año (D’Croz & Robertson, 1997). Este estado cambia completamente durante la temporada seca (enero a abril), cuando el golfo queda sujeto a los vientos del Norte y se produce el afloramiento (Forsbergh, 1969, Kwiecinski & Chial, 1983). En el Golfo de Panamá la termoclina alcanza su máximo ascenso entre los meses de febrero y marzo (Forsbergh, 1969, Kwiecinski *et al.*, 1975, D’Croz & O’Dea, 2007). Por el contrario, entre los meses de octubre y diciembre la termoclina se encuentra en la profundidad máxima, generalmente entre 50 y 60 m.

Las razones del cambio de nivel de la termoclina están vinculadas al mecanismo de transporte de Ekman que provoca un movimiento de agua hacia la derecha (en el hemisferio Norte), de la dirección en que sopla el viento (Kessler, 2006). El surtidor de viento que cruza el istmo en la temporada seca está alineado con el eje del golfo y es más intenso en la parte central y produce divergencia en las aguas a la izquierda de la dirección de flujo del viento. Esto, a su vez, induce el transporte vertical de Ekman que causa la elevación de las termohalinas (Kessler, 2006). La turbulencia formada por los fuertes vientos del Norte propicia la mezcla de las aguas de la termoclina con las superficiales y se forma una pluma de agua fría y salina del lado Este del golfo que se extiende hasta Colombia (Rodríguez-Rubio & Stuardo, 2002). En cambio, a la derecha del flujo del viento en el Golfo de Panamá ocurre un proceso de convergencia que causa el hundimiento de la masa superficial frente a la Península de Azuero. La migración vertical de la termoclina es un fenómeno estacional que ocurre en todas las áreas de afloramiento costero de la América Central (Kessler, 2002).

Mediante el análisis de los datos se confirmó que la distribución de la temperatura superficial del mar en el Golfo de Panamá es significativamente diferente entre la temporada lluviosa y la temporada seca (prueba-z = 24,  $p < 0.01$ ). La temperatura superficial fue homogéneamente cálida durante la temporada lluviosa. La temperatura promedio fue 27.8 °C y varió entre 27.1 °C y 29.55 °C (Fig. 2a).

La Fig. 3a presenta el patrón promedio mensual del índice de esfuerzo del viento ( $\tau$ ), a partir de las mediciones de vientos en Balboa. El valor de  $\tau$  aumenta a partir de enero y alcanza el promedio máximo en marzo (0.037 N m<sup>-2</sup>). Los valores  $\tau$  más bajos ocurren entre mayo y la primera mitad de diciembre. En la Fig. 3b y en el Cuadro 1, vemos el campo de viento correspondiente al crucero de marzo de 1933. La intensidad del viento durante este crucero sugiere un evento de afloramiento particularmente fuerte y los campos de vientos en el eje central del golfo corresponden a índices de esfuerzo por encima de 0.1 N m<sup>-2</sup>. Este valor de esfuerzo del viento supera por un orden de magnitud a los calculados a partir de la estación de Balboa, posiblemente porque éstos últimos son un promedio de 51 años y la intensidad del viento en Balboa está reducida por efecto de la topografía local. En general, la intensidad del viento es superior mientras mayor es la distancia a la costa (Fig. 3b).

La temperatura superficial promedio durante el crucero de la estación seca fue 20.7 °C y varió entre 16.2 °C y 25.4 °C. En general, durante este afloramiento ocurrió un descenso de la temperatura superficial del orden de los 10 °C (Fig. 2b). Los intensos vientos y el descenso de la temperatura superficial registrados dan apoyo a la idea de que el afloramiento descrito se clasifica como de intensidad fuerte, según el análisis histórico de estos eventos en el Golfo de Panamá (D’Croz et al., 2003).

La distribución de la temperatura de la sección longitudinal promedio del Golfo de Panamá durante el crucero de marzo de 1933 sugiere que la termoclina asciende hasta ubicarse muy cerca de la superficie (Fig. 4a). Esto causa el descenso de la temperatura superficial durante la temporada seca (Fig. 2b).

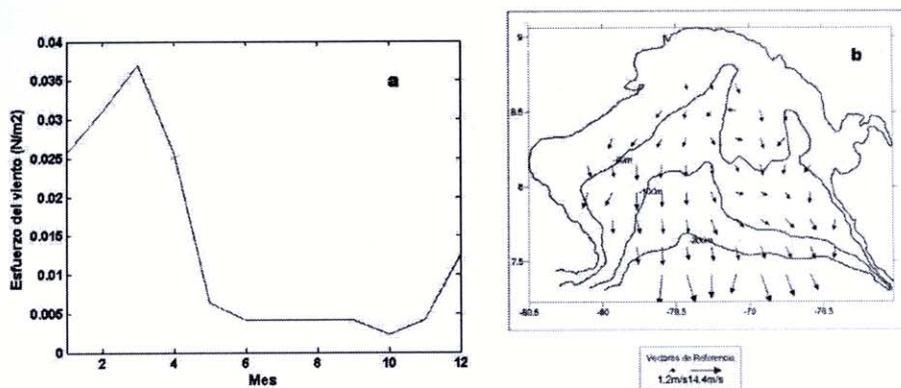


Fig. 3. a. Esfuerzo del viento ( $\tau$ ), promedios mensuales de un registro de los años 1915 a 1965. b. Campo de viento observado en el crucero de 1933.

Cuadro 1. Promedios de la velocidad y dirección del viento en el crucero de marzo de 1933 en el Golfo de Panamá.

Día	Velocidad promedio (m/s)	Dirección promedio (grados)
9	6.1	345
10	4.4	350
11	14.0	360
12	8.9	340
13	3.5	340
14	4.4	340
15	1.7	330
16	3.1	335
17	3.4	300
21	0.9	330
22	2.5	350
23	4.8	360

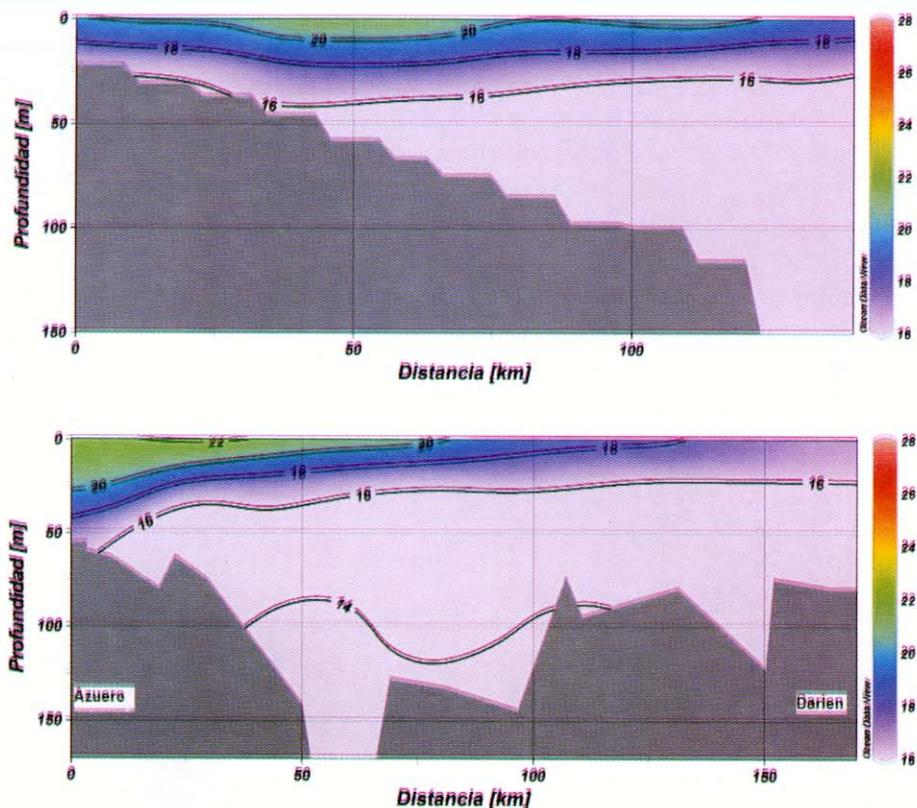


Fig. 4. Distribución de las isotermas ( $^{\circ}\text{C}$ ) durante el afloramiento, estación seca (marzo 1933). a. En sección longitudinal del Golfo de Panamá (longitud  $79^{\circ} 15' \text{ W}$ ), b. En sección transversal en la entrada al Golfo de Panamá (latitud  $7^{\circ} 45' \text{ N}$ ).

#### *Características termohalinas*

De acuerdo a los diagramas de temperatura-salinidad (T-S), la mayor parte de las salinidades medidas durante la temporada lluviosa (noviembre de 1967), son menores a 34 y las temperaturas son mayores que  $25^{\circ}\text{C}$  (Fig. 5a). Estas características concuerdan con la masa de agua conocida como Agua Superficial Tropical ( $T > 25^{\circ}$ ,  $S < 34$ ), que según Fiedler & Talley (2006), ocupa gran parte del Pacífico Oriental Tropical. Es una masa de agua cálida por efecto de la alta irradiación solar y su baja salinidad se relaciona al exceso de la precipitación sobre la evaporación que ocurre por debajo de la ZCIT y a la fuerte escorrentía que proviene de la cuenca Oeste de los Andes colombianos (Fiedler & Talley, 2006).

El giro ciclónico de Colombia posiblemente mueve parte del Agua Tropical Superficial ubicada en Colombia hacia Panamá y por esta razón, la salinidad promedio en el Golfo de Panamá es la más baja (< 31 psu) de todo el Pacífico Oriental tropical. Salinidades mas bajas que 34 psu, generalmente se encuentran en aguas superficiales con profundidades menores de 50 metros (D’Croze & O’Dea, 2007). Bajo condiciones de afloramiento, el golfo se llena con agua más salina y fría, como puede comprobarse en el diagrama T-S para marzo de 1933 (Fig. 5b). En el área de mayor intensidad de afloramiento, la temperatura superficial es 16.45 °C y la salinidad 34.81 psu. Estas propiedades corresponden al agua que se encuentra por debajo de la termoclina estacional, aproximadamente entre 50 m y 80 m.

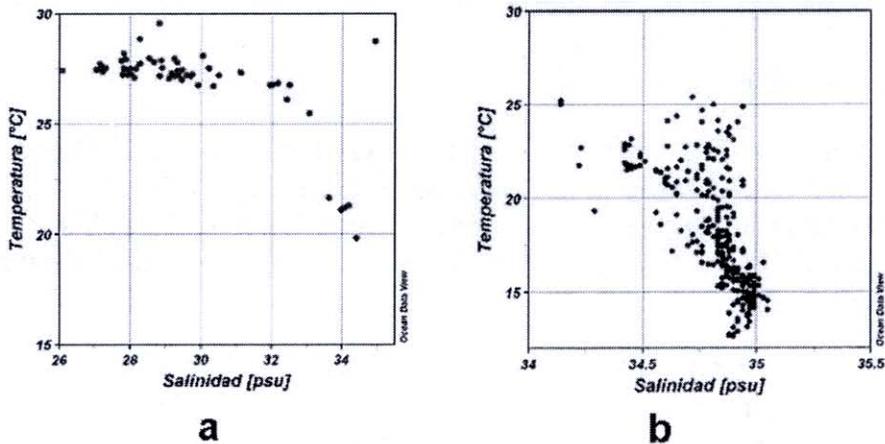


Fig. 5. Diagramas T-S (temperatura-salinidad), para aguas del Golfo de Panamá.

a. Durante la temporada lluviosa (noviembre 1967) y que representa la condición sin afloramiento. b. Durante el afloramiento correspondiente a la temporada seca (marzo 1933).

## CONCLUSIONES

El patrón espacial en la distribución de la temperatura superficial del mar en el Golfo de Panamá es significativamente diferente entre la temporada lluviosa y la temporada seca. Durante la temporada lluviosa predominan las temperaturas cálidas (> 27.5 °C) y salinidad diluida (< 31 psu), por efecto de las lluvias y la escorrentía. Esta temporada se

caracterizó por la poca variabilidad en las condiciones superficiales. En cambio, durante la temporada seca el agua superficial es más fría ( $< 21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y más salina ( $> 34\text{ psu}$ ), como resultado del ascenso de la termoclina. El efecto del afloramiento es más intenso en el lado oriental del golfo en donde la temperatura superficial es  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  más fría que en el lado occidental. Esto es consecuencia de la topografía de la termoclina, que se inclina hacia el lado occidental (Península de Azuero), pero prácticamente llega a la superficie en el lado oriental. Las razones de este patrón se vinculan al mecanismo de transporte de Ekman que está asociado a la dirección e intensidad de los vientos (Willet et al., 2006).

## REFERENCIAS

- Amador, J.A., E.J. Alfaro, O.G. Lizano & V.O. Magaña. 2006. Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography* 69: 101-142.
- Conkright, M.E., J.I. Antonov, O. Baranova, T. P. Boyer, H.E. García, R. Gelfeld, D. Jonson, R.A. Locarnini, P.P. Murphy, T.D. O'Brien, I. Smolyar & C. Stephens. 2002. World Ocean Database 2001, Volume 1: Introduction. NOAA Atlas NESDIS 42, U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 167 pp.
- D'Croz, L. & A. O'Dea 2007. Variability in upwelling along the Pacific shelf of Panama and implications for the distribution of nutrients and chlorophyll. *Estuarine, Coastal, and Shelf Science* 73: 325-340
- D'Croz, L., B. Kwiecinski, J.L. Maté, J.A. Gómez & J.B. Del Rosario. 2003. El afloramiento costero y el Fenómeno de El Niño: Implicaciones sobre los recursos biológicos del Pacífico de Panamá. *Revista Tecnociencia* 5: 35-49.
- D'Croz, L. & D.R. Robertson. 1997. Coastal oceanographic conditions affecting coral reefs on both sides of the Isthmus of Panama. *Proceedings of the 8th International Coral Reef Symposium* 2, 2053-2058.

D'Croz, L., J.B. Del Rosario & J.A. Gómez. 1991. Upwelling and phytoplankton in the Bay of Panamá. *Revista de Biología Tropical* 39: 233-241.

Fiedler, P.C. 2002. The annual cycle and biological effects of the Costa Rica Dome. *Deep-Sea Research* 49: 321-338.

Fiedler, P.C. & L.D. Talley. 2006. Hydrography of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography* 69: 143-180.

Fiedler, P.C., V. Philbrick, & F.P. Chavez. 1991. Oceanic upwelling and productivity in the eastern tropical Pacific. *Limnology and Oceanography* 36: 1834-1850.

Forsbergh, E. D. 1969. On the climatology, oceanography and fisheries of the Panamá Bight. *Inter-American Tropical Tuna Commission Bulletin* 14: 49-259.

Kessler, W.S. 2002. Mean three-dimensional circulation in the north-east tropical Pacific. *Journal of Physical Oceanography* 32: 2457-2471.

Kessler, W.S. 2006. The circulation of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography* 69: 181-217.

Kwieceński, B. & B. Chial. 1983. Algunos aspectos de la oceanografía del Golfo de Chiriquí, su comparación con el Golfo de Panamá. *Revista de Biología Tropical* 31: 323-325.

Kwieceński, B., A.L. Jaén & A.M. Muschett. 1975. Afloramiento en el Golfo de Panamá durante la temporada de 1973. *Anales del Centro de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México* 2: 73-80.

Rodríguez-Rubio, E. & J. Stuardo. 2002. Variability of photosynthetic pigments in the Colombian Pacific Ocean and its relationship with the wind field. *Proceedings of the Indian Academy of Science (Earth Planet Science.)*, 111: 227-236.

Schlitzer, R. 2002. Alfred-Wegener-Institute for Polar and Marine Research, Bremerhaven, Alemania (<http://www.awi-bremerhaven.de/GPH/ODV>).

Smayda, T.J. 1966. A quantitative analysis of the phytoplankton of the Gulf of Panamá. III. General ecological conditions, and the phytoplankton dynamics at 8o 45'N, 79o23'W from November 1954 to May 1957. Inter-American Tropical Tuna Commission Bulletin 11, 353-612.

Willett, C.S., R. R. Leben & M.F. Lavin. 2006. Eddies and Tropical Instability Waves in the eastern tropical Pacific: A review. Progress in Oceanography 69: 218-238.

Xie, S-P., H. Xu, W.S. Kessler & M. Nonaka. 2005. Air-sea interaction over the eastern Pacific warm pool: gap winds, thermocline dome, and atmospheric convection. J. Clim. 18: 5-20.

### **AGRADECIMIENTOS**

La Red de Datos e Información Oceánica para las regiones del Caribe y América del Sur (ODINCARSA por sus siglas en inglés), proporcionó entrenamiento en la gestión de datos oceanográficos a uno de los autores (L.M. González), lo cual ha permitido el acceso a bases de datos de cobertura global. La Autoridad del Canal de Panamá facilitó la información sobre los vientos en la estación de Balboa. Los autores agradecen al editor de la Revista Tecnociencia y a un revisor anónimo sus comentarios y observaciones que han mejorado la presentación del manuscrito. Se agradece a J.B. Del Rosario por el apoyo.

*Recibido septiembre de 2006, aceptado agosto de 2007.*