

Dinámica de aguas alrededor de la Isla del Coco, Costa Rica

Omar G. Lizano R.

Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR), Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI), Departamento de Física Atmosférica, Oceánica y Planetaria (DFAOP), Escuela de Física, Universidad de Costa Rica. San José 11501-2060, Costa Rica. Fax: (506) 207-3280; omar.lizano@ucr.ac.cr.

Recibido 14-IX-2007. Corregido 30-V-2008. Aceptado 11-VI-2008.

Abstract: Water dynamics around Cocos Island, Costa Rica. Surface and sub-surface data were analyzed using chemical and physical parameters, nutrients and dissolved oxygen in the eastern tropical Pacific, based on databases, numerical models and satellite observations. The surface marine current pattern during the first quarter of the year was different from the rest. It is known that the North Equatorial Countercurrent does not reach the island at this time, and a clockwise gyre centered on Isla del Coco (Cocos Island) was stabilized with an intense coastal current generated south of the Gulf of Panama, initially moving in a south direction and then west. It is at this time when the Inter-tropical Convergence Zone is at its most northerly position (around 10°N), and the dynamics of the eastern tropical Pacific is driven by the surface Caribbean easterly wind stress crossing the topographic gaps in Central America. The upwelling in the Gulf of Papagayo is evident and from the surface spatial distributions of temperature, salinity and nutrients, an advection towards Isla del Coco is identified. When the Inter-tropical Convergence Zone is displaced to the south (around 5°N), the Papagayo upwelling disappears, the southern trade winds intensify and a strong Equator-Peru upwelling is developed. Nevertheless, from the latitudinal depth profiles and the spatial distributions of physical parameters and nutrients, no advection is evident in the monthly averages from this zone. Between May and October the island was always reached by the North Equatorial Countercurrent. On average, the waves that reach Isla del Coco arrive from the southwest. However, during the boreal winter, the storms generate waves with sufficient energy to reach the island from the northwest. Additionally, at this time of the year, Trade Winds from the Caribbean blow strong across the topographical Papagayo and Panama gaps, generating waves towards the southwest that can reach the island and the remote swell from the southwest losses energy. Rev. Biol. Trop. 56 (Suppl. 2): 31-48. Epub 2008 August 29.

Key words: Cocos Island, eastern tropical Pacific, nutrients, surface currents, latitudinal profiles, Isla del Coco, Costa Rica.

La Isla del Coco está ubicada aproximadamente a 500 km de Costa Rica (Lizano 2001), y alrededor de los 87°W y 5.5°N dentro de una región denominada como el Pacífico Tropical Este (PTE) (Wyrтки 1967, Kessler 2006). Dado al gran potencial para la pesca del atún, el Scripps Institution of Oceanography realizó una intensa investigación en esta zona entre los años 1950 y 1960 (Wyrтки 1966). Varios trabajos sobre la circulación, la dinámica y las propiedades del agua resultaron luego de este estudio (Kessler 2006). A la luz de la nueva tecnología y de la recopilación de más datos sobre los

océanos en las últimas décadas, recientemente se realizó una revisión de literatura del PTE, proyecto en el cual surgieron nuevas contribuciones. Se publicó una serie de artículos en un Número Especial (Volumen 69) de Progress in Oceanography (Amador *et al.* 2006, Fiedler & Talley 2006, Kessler 2006, Willet *et al.* 2006). A partir de estos trabajos se resume que la dinámica de esta zona está ligada a los fuertes vientos que atraviesan a lo largo de los pasos topográficos de Tehuantepec al sur de México, el Golfo de Papagayo en el Pacífico norte de Costa Rica y el Golfo de Panamá (Wyrтки

1965, 1966, 1967, Clarke 1988, Legekis 1988, Badan-Dangon 1998, Amador *et al.* 2006). La variación estacional del viento y la oscilación meridional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), modifican la estructura dinámica del PTE (Kessler 2006). Rasgos dinámicos propios, como remolinos de mesoescala y ondas atrapadas, importantes en el transporte de masas, calor, organismos y nutrimentos, han sido identificados desde los satélites (Karger 2000, Willet *et al.* 2006), ligados algunos a la intermitencia de los vientos a través de las depresiones topográficas y a la divergencia de la Contracorriente Ecuatorial Norte (CCEN) al alcanzar las costas Centroamericanas. Desde los estudios de Wyrтки (1964) se sabe que en esta región hay altas concentraciones de nutrimentos, especialmente alrededor del Domo Térmico de Costa Rica (Fiedler & Philbrick 1991, Fiedler 1994, Fiedler & Behringer 2000). Fiedler (2006) señala además, que hay altas concentraciones de nutrimentos en el Ecuador y sobre los bordes este de las corrientes marinas.

Uno de los primeros análisis de las corrientes superficiales en el PTE fue publicado por Wyrтки (1965), basados en los mapas climatológicos mensuales publicados por el U.S. Hydrographic Office (Anónimo 1947). Se encontró que el sistema de corrientes en el PTE representa la zona más al este de los dos anticiclones subtropicales del Pacífico, uno al norte del Ecuador y el otro al sur del Ecuador (Wyrтки 1965, 1966, 1967). Sobre el borde sur del anticiclón del Pacífico norte se encuentra la Corriente Ecuatorial del Norte (CEN) con dirección hacia el oeste. Sobre el borde norte del anticiclón del Pacífico sur se encuentra la Corriente Ecuatorial del Sur (CES) con dirección hacia el oeste también, y entre estas corrientes, se observa la Contracorriente Ecuatorial (CCE) que fluye hacia el este.

Una breve descripción climatológica del oleaje en esta región fue realizada en el artículo de Amador *et al.* (2006), donde indican dos fuentes distintas del oleaje en la región. Una de origen remoto, cuyo oleaje es generado por las tormentas en los ciclones subtropicales del Pacífico norte y del Pacífico sur del planeta, y

otra de carácter local, cuyo oleaje es generado por la intensificación de los vientos oeste ecuatoriales Lizano (2007), los ciclones tropicales que se desarrollan en el PTE, y por los chorros de viento que atraviesan los pasos topográficos de Centroamérica.

Varios trabajos se han escrito sobre el Domo Térmico de Costa Rica (DTCR) por su singular productividad (Wyrтки 1964, Umatani & Yamagata 1990, Fiedler 1992, Fiedler 1994, Fiedler & Behringer 2000), pero poco sobre la Isla del Coco. Glynn y Ault (2000) y Fiedler y Talley (2006) sitúan a esta isla en una región promedio de la CCEN, con los procesos dinámicos del DTCR al norte, y al sur con el afloramiento del Perú. Resultados más recientes de derivadores lagrangeanos superficiales (Kessler 2006), sustentan esta posición promedio de la CCEN sobre la isla. Esta corriente se intensifica entre agosto-enero y se debilita durante la primavera boreal del hemisferio norte. Según Wyrтки (1965) la isla puede ser alcanzada por las corrientes de Perú cuando la ZCIT está más al norte (abril) y no llega la CCEN, y cuando la ZCIT está más al sur (octubre), siempre es alcanzada por la CCEN. La isla está también sobre la región más al este del Pacífico donde la salinidad es baja debido a la alta precipitación, razón por la que cuenta con el mínimo valor de salinidad en los océanos tropicales (Kessler 2006, Fiedler & Talley 2006).

En el presente trabajo se analizan datos climatológicos superficiales y sub-superficiales de parámetros físicos y químicos, nutrimentos y oxígeno disuelto sobre el PTE, algunos resultados de bases de datos, y otros de modelos numéricos y observaciones satelitales. La resolución de la distribución espacial de estos datos analizados permite identificar los principales rasgos dinámicos y las variaciones climáticas alrededor de la Isla del Coco. Se identifican las fuentes y sumideros de algunos nutrimentos, su relación con el viento, las corrientes superficiales y el afloramiento frente al Golfo de Papagayo de Costa Rica, del Domo Térmico de Costa Rica y del afloramiento frente a las costas de Ecuador-Perú. Estos resultados pretenden mostrar las características de estas

aguas, sentar las bases de sus magnitudes y variaciones estacionales, de manera que permita orientar las investigaciones que se realizan actualmente alrededor de la Isla del Coco (por ejemplo, Acuña *et al.* 2008).

MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos batimétricos del PTE fueron obtenidos de The General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) de la Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC). Estos datos tienen una resolución espacial de un segundo (aproximadamente 1851 m a 10° de latitud). Interpolaciones batimétricas, con rejillas de 1000 m de resolución espacial, fueron realizadas con Surfer ver. 8.0 (Golden Software, Inc.) para identificar los principales rasgos alrededor del fondo marino de la Isla del Coco (Fig. 1). Datos observados mediante altímetro y escatómetro de satélite (desde 1992- hasta el presente) del Programa de la NOAA: Ocean Surface Current Analyses-Real Time (OSCAR), fueron utilizados para realizar la climatología mensual y trimestral de las corrientes marinas superficiales en el PTE. La mayoría de los datos climatológicos de parámetros físicos y químicos de la World Ocean Data Base 2005, con resolución espacial de un grado, de la Nacional

Oceanographic Data Center de la NOAA, fueron extraídos y analizados con el software Ocean Data View (ODV) del Alfred Wegener Institut de Alemania. Los datos sobre temperatura y salinidad de la base de datos Ocean Data View 2005 están disponibles con una resolución espacial de ¼ de grado. Promedios trimestrales fueron elaborados de algunos parámetros oceánicos para representar las condiciones promedio y las variaciones estacionales según el desplazamiento de la ZCIT al norte o sur del planeta. Datos de re-análisis del modelo de pronóstico de oleaje WAVEWATCH III de la NOAA, fueron utilizados para realizar la climatología del oleaje y del viento alrededor de la Isla del Coco.

RESULTADOS

A. Ubicación y configuración batimétrica alrededor de la Isla del Coco: La Isla del Coco emerge a la superficie como una montaña submarina en el Dorsal Cocos (Figs. 1A, B). El Dorsal Cocos se origina en las Islas Galápagos de Ecuador y se proyecta hacia el noreste hasta alcanzar la Península de Osa al sur de Costa Rica. La isla está inmersa en la Placa Cocos, la cual tiene como bordes hacia los continentes, la Fosa Suramericana al este

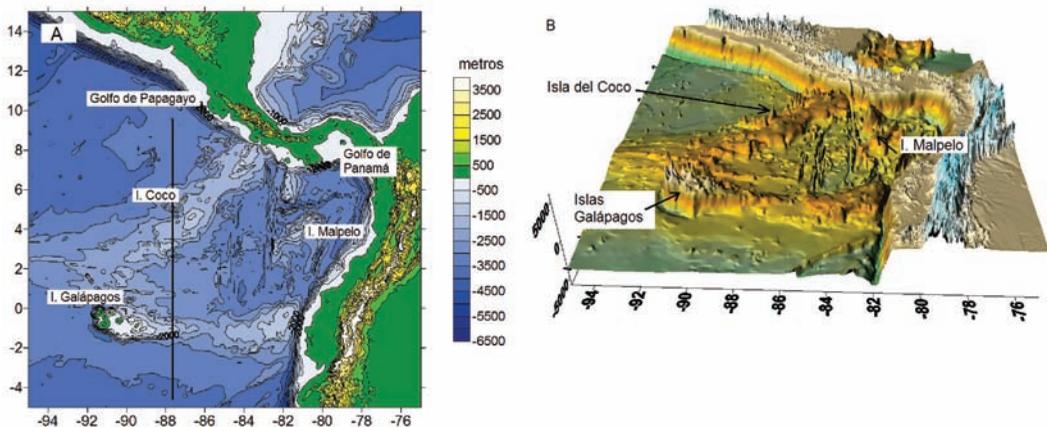


Fig. 1. Relieve topográfico y batimétrico en el Pacífico Tropical Este en: A) dos dimensiones y B) tres dimensiones.

Fig. 1. Topographic relief and bathymetry of the eastern tropical Pacific in: A) two dimensions, and B) three dimensions.

y la Fosa Mesoamericana al norte. Al noroeste del Dorsal Cocos se sitúa una planicie abisal con profundidades que alcanzan los 4000 m. Al este del Dorsal Cocos las profundidades también aumentan sobre el Panamá Bight (Badan-Dangon 1998; Rodríguez-Rubio *et al.* 2003), pero conforman una batimetría irregular con montañas submarinas, algunas de las cuales emergen desde profundidades de más de 3000 m. Sobre este grupo de montañas submarinas al este, emerge la Isla Malpelo que pertenece a Colombia (Fig. 1B). El Dorsal Carnegie (Castillo *et al.* 1988), que se proyecta hacia el este desde las Islas Galápagos hasta alcanzar la costa de Ecuador, aísla en gran medida esta cuenca batimétrica interna: Galápagos-Cocos-Malpelo.

B. Corrientes superficiales en el Pacífico

Tropical Este: La distribución espacial de corrientes superficiales en el PTE se muestra en la Figura 2. Durante el primer trimestre del año (Fig. 2A) se identifica una circulación anticiclónica, centrada ligeramente al sur de la Isla del Coco. La intensidad de esta corriente se evidencia sobre el borde norte de este giro alcanzando la costa de Costa Rica. También es intensa al este o sur del Golfo de Panamá (o frente a las costas de Colombia), producto de la divergencia de este giro anticiclónico con un giro ciclónico más al este, que no se resuelve con estos datos, pero que es evidente desde los resultados de Rodríguez-Rubio *et al.* (2003). La corriente luego continúa hacia el oeste centrada en los 2-3°N. Por el borde sur (cerca del ecuador geográfico) la alcanza la corriente originada desde el sur frente a Ecuador-Perú. Al norte del giro anticiclónico alrededor de la Isla del Coco, y frente al Golfo de Papagayo, se identifica un giro ciclónico con una corriente fuerte frente a la costa que se dirige hacia el oeste a aproximadamente 10°N.

En el segundo trimestre del año (Fig. 2B) se identifican estos mismos giros pero cambiando las intensidades de las corrientes. Sobre el borde norte del giro anticiclónico de la Isla del Coco, la corriente hacia el este es más intensa y centrada en 5-6°N. Esta corriente es originada

en esta época por la Contracorriente Ecuatorial Norte (CCEN) que se manifiesta a partir de mayo (Wyrtyk 1966, 1967, Kessler 2006). La corriente frente al Golfo de Papagayo (hacia el oeste) ya no es tan intensa. La corriente al sur, frente a la costa de Ecuador continúa intensa, pero se debilita tan pronto cruza el Ecuador, condición que se mantiene el resto del año.

Para el tercer trimestre del año (Fig. 2C), la CCEN está bien establecida con un máximo flujo hacia el este que llega hasta los 90°W y 6°N, corriente que con menor intensidad continúa a través de la Isla del Coco en su paso hacia la costa de Suramérica.

El cuarto trimestre (Fig. 2D) es similar al anterior, solo que la CCEN alcanza los máximos un poco más al este. Es evidente durante todo el año la intensidad de la corriente superficial frente a la costa de Ecuador, corriente que se dirige al norte desde los 5°S y que se debilita tan pronto cruza el Ecuador y converge con las corrientes costeras desde el norte.

C-1. Distribución espacial de temperatura, salinidad, altura dinámica y la profundidad de la capa de mezcla con la ZCIT más al sur:

La Figura 3 muestra el promedio trimestral (enero a marzo) de las distribuciones espaciales de Temperatura Superficial del Mar (TSM), la Salinidad Superficial del Mar (SSM), la Altura Dinámica (AD) y la Profundidad de la Capa de Mezcla (PCM) (Knauss 1978). Los valores promedio anuales y estacionales en puntos específicos a lo largo del transecto de la Fig. 1, son también resumidos en el Cuadro 1. Para esta época del año, es evidente el afloramiento en el Golfo de Papagayo con temperaturas entre 24.5 y 25.0°C (Fig. 3A). Este afloramiento abarca una región más amplia que el golfo mismo, que incluye el Pacífico sur de Nicaragua y Pacífico norte de Costa Rica. En menor grado de intensidad, se nota también, el afloramiento frente el Golfo de Panamá. Este mínimo relativo de temperatura se extiende hacia el sur a lo largo de la costa este de Colombia, con un frente térmico al oeste y al este. Los datos anteriores del World Ocean Data Base 2001 (Conkright *et al.* 1994, Levitus & Boyer 1994), no permitían

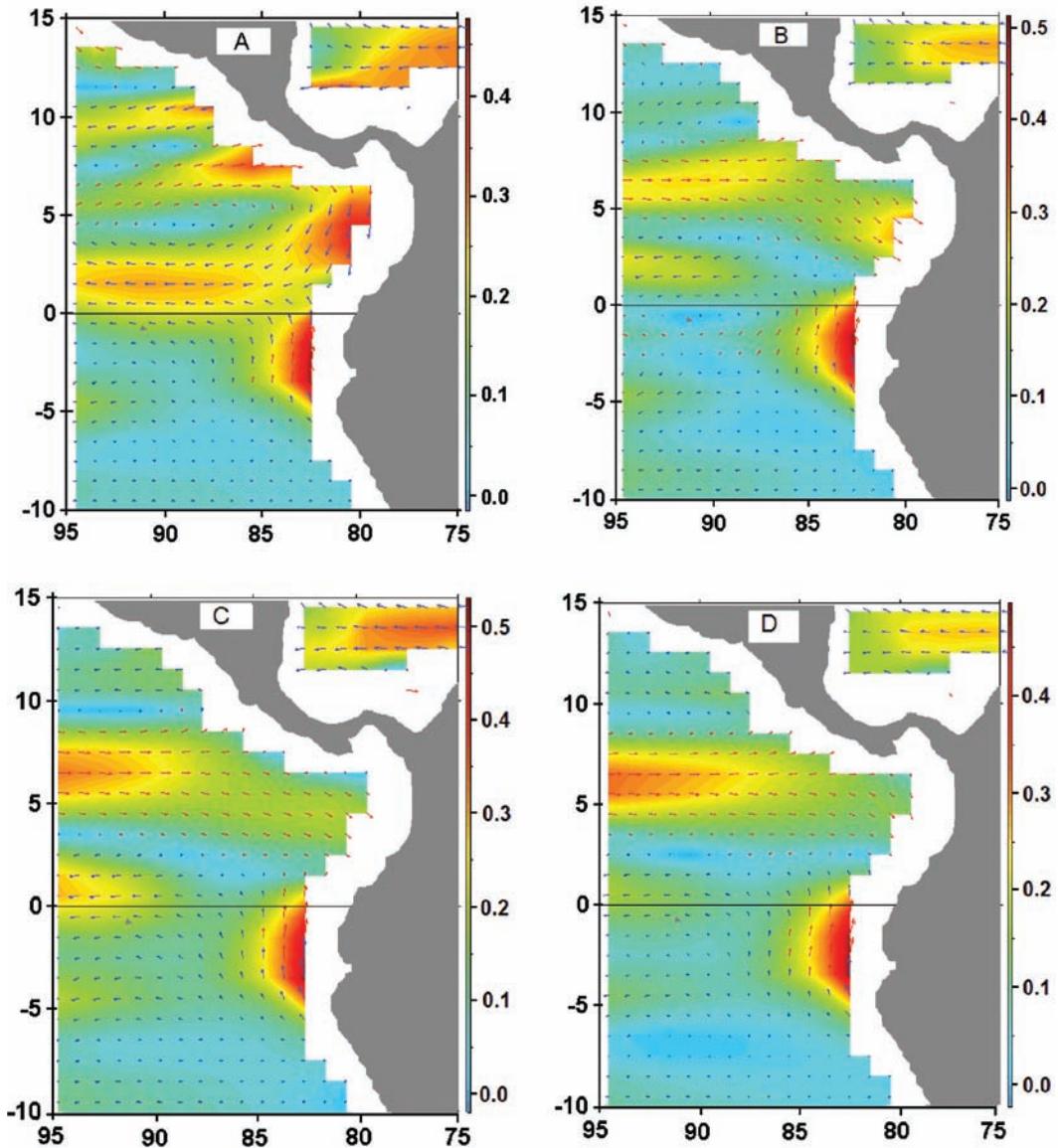


Fig. 2. Promedios trimestrales de las velocidades (m/seg) de las corrientes marinas en la superficie del océano en: A) Enero-Marzo, B) Abril-Junio, C) Julio-Setiembre y D) Octubre-Diciembre en el Pacífico Tropical Este.

Fig. 2. Quarterly averages of marine current speeds (m/seg) on the ocean surface in: A) January-March, B) April-June, C) July-September, and D) October-December in the eastern tropical Pacific.

resolver esta distribución de la temperatura es característica de esta zona y que también se identifica desde datos de satélite (Rodríguez-Rubio *et al.* 2003). Este mínimo continúa hacia el sur hasta alcanzar el afloramiento de

Ecuador-Perú, condición que también describe Legeckis (1998) a través de imágenes de satélite. La Isla del Coco se sitúa entre los dos afloramientos y sobre un dorsal térmico o acumulación de agua más cálida (28.05°C, Cuadro

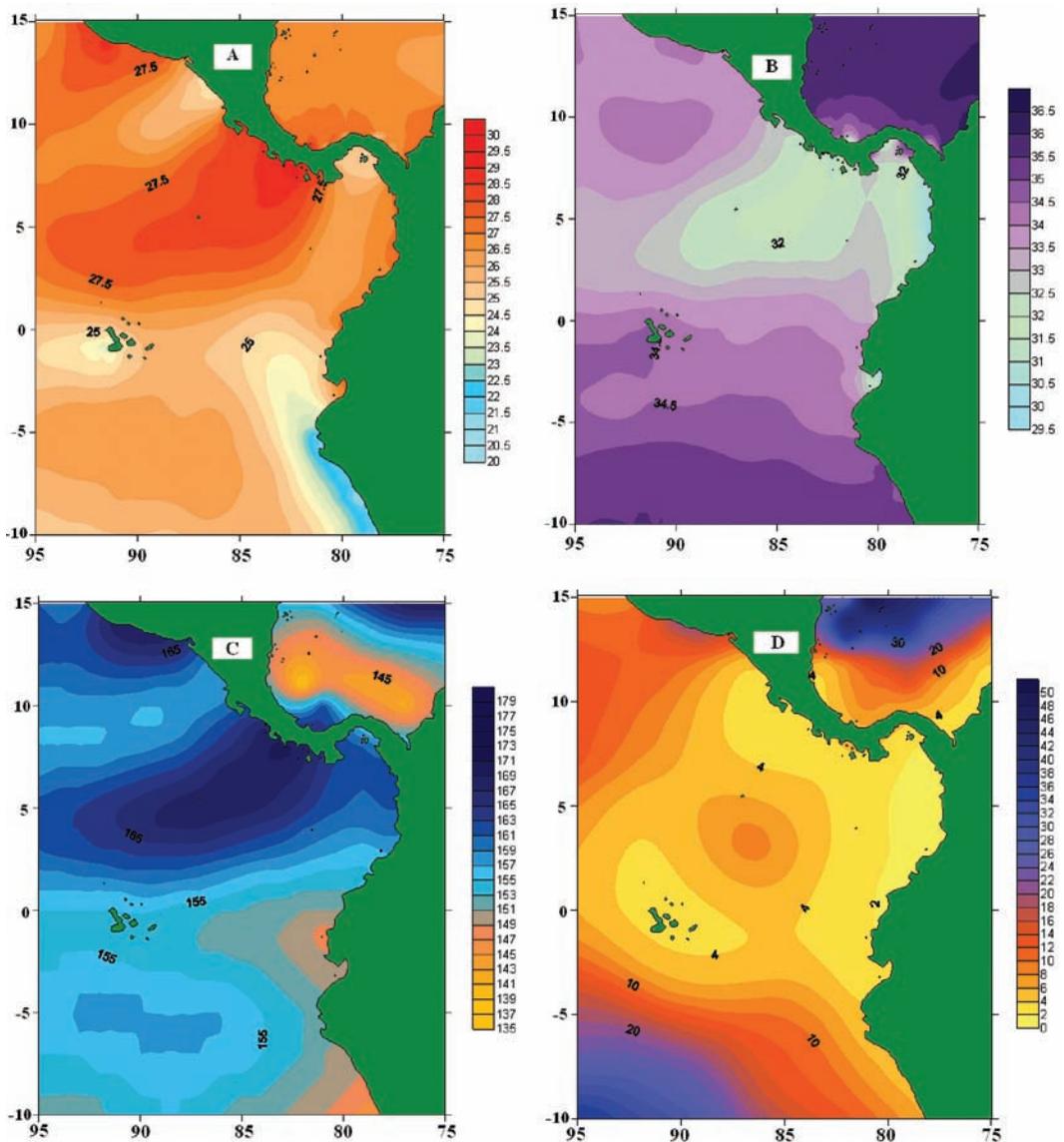


Fig. 3. Promedios trimestrales (Enero-Marzo) en la superficie del océano de la distribución espacial de: A) TSM (Temperatura Superficial del Mar), B) SSM (Salinidad Superficial del Mar), C) AD (Altura Dinámica del mar), D) PCM (Profundidad de la Capa de Mezcla) en el Pacífico Tropical Este.

Fig. 3. Quarterly averages (January-March) in the surface spatial distribution of: A) Sea Surface Temperature, B) Sea Surface Salinity, C) Dynamic Height of the sea, and D) Depth of the Mixing Zone in the eastern tropical Pacific.

1) que se proyecta hacia la costa de Costa Rica y Panamá, y que puede alcanzar un valor máximo (promedio trimestral) de alrededor de 30°C sobre el borde costero. Sobre la costa de Perú se identifica claramente el afloramiento costero

que se extiende como una lengua fría, primero hacia al noroeste y luego hacia el oeste, creando un frente térmico con las aguas más cálidas del norte que se mantiene ligeramente al norte del ecuador geográfico.

CUADRO 1
*Concentraciones anuales y variaciones estacionales de algunos parámetros en la superficie del océano
a lo largo del transecto de Fig. 1*

TABLE 1
Annual concentrations and stationary variations of some parameters in seawater surface of the transect in Fig. 1

Lugar	Promedios Anuales							
	Oxígeno disuelto (ml/L)	Silicatos (μmol/kg)	Nitratos (μmol/kg)	Fosfatos (μmol/kg)	Salinidad (ups)	Temperatura (°C)	Altura dinámica (cm)	PCM* (m)
Domo Térmico	4.72	2.9	4.5	0.49	33.63	27.41	159.33	3.73
Isla del Coco	4.67	2.0	1.6	0.33	32.93	27.67	166.84	10.16
Afloramiento Perú	4.91	5.6	7.2	0.77	34.87	23.41	151.61	16.52
	Promedio Enero-Marzo							
Domo Térmico	4.77	5.5	5.8	0.74	33.85	26.54	160.27	4.03
Isla del Coco	4.76	3.0	2.4	0.36	32.40	28.05	168.70	6.53
Afloramiento Perú	4.89	3.8	3.7	0.48	34.53	26.28	168.70	6.53
	Promedio Abril-Junio							
Domo Térmico	4.97	4.1	1.6	0.34	33.80	28.32	157.40	4.80
Isla del Coco	4.73	2.7	0.4	0.17	32.96	28.44	168.80	9.90
Afloramiento Perú	4.73	4.6	6.8	0.90	34.99	24.26	152.53	7.07
	Promedio Julio-Setiembre							
Domo Térmico	4.54	0.2	5.5	0.37	33.47	27.97	156.10	2.60
Isla del Coco	4.61	0.8	1.7	0.27	33.27	27.39	164.06	13.40
Afloramiento Perú	4.92	8.7	11	1.03	35.03	21.09	147.93	30.80
	Promedio Octubre-Diciembre							
Domo Térmico	4.59	1.8	4.9	0.53	33.41	26.80	156.86	3.46
Isla del Coco	4.59	1.7	1.9	0.50	33.11	26.79	164.93	10.80
Afloramiento Perú	5.09	5.5	7.4	0.67	34.93	22.02	150.46	13.16

Domo Térmico: 87.5°W - 9.5°N

Isla del Coco: 87.5° - 5.5°N

Afloramiento Perú: 87.5°W - 4.5°N

*PCM = Profundidad de la Capa de Mezcla

Mayores salinidades se notan frente al afloramiento de Papagayo y en el afloramiento de Ecuador-Perú. La isla está inmersa sobre un dorsal de bajas salinidades (32.4 ups, Cuadro 1) que alcanza un promedio trimestral mínimo de 31.2 ups al sureste de Costa Rica y algo menor sobre las costas de Colombia. Estos datos del Word Ocean Data Base 2005, también permiten identificar un máximo relativo de salinidad que se proyecta al suroeste del Golfo de Panamá creando dos frentes salinos al oeste y este (costa de Colombia) a lo largo de este eje.

De las distribuciones espaciales superficiales de temperatura y salinidad se puede entender la distribución espacial de la AD, o altura promedio del nivel del mar (Fig. 2C). Se ubica a la Isla del Coco sobre un lomo o dorsal oceánico, con una depresión al norte frente del Golfo de Papagayo y que se extiende al oeste más allá de los 85°W, y una depresión al sur con el afloramiento del Perú. La distribución espacial de la PCM (Fig. 2D) muestra una capa de mezcla muy delgada al norte del Ecuador y sobre toda esta región al este de los 95°W, una característica típica de esta zona (Fiedler 1992). En la Isla del Coco, el valor de PCM = 6.53 m (Cuadro 1), es tan solo ligeramente mayor que el del DTCR (4.03 m) para esta época. Valores máximos de 50 m se notan al frente de Perú sobre los 10°S y 95°W.

C-2. Distribución espacial superficial de nutrientes y oxígeno disuelto con la ZCIT más al sur: De las distribuciones espaciales superficiales de las concentraciones en fosfatos, nitratos, silicatos y oxígeno disuelto, se nota que durante esta época los valores más altos de estos compuestos está frente al Golfo de Papagayo y frente a Ecuador-Perú (Fig. 4). Es evidente la influencia del afloramiento de Papagayo sobre la Isla del Coco (Figs. 4A, B, C). También es evidente que, a pesar de las mayores concentraciones de estos compuestos en la zona de afloramiento de Ecuador-Perú, no se identifica, en el promedio trimestral, una advección superficial sobre la Isla del Coco.

Aunque las variaciones superficiales de oxígeno disuelto son pequeñas, se nota un

máximo superficial (Fig. 4D) en las regiones vecinas de los afloramientos costeros del Golfo de Papagayo y de Ecuador-Perú (alrededor de 5 ml/L), y un mínimo al sur del Golfo de Panamá y frente a las costas de Colombia (4.25 ml/L). En la Isla del Coco su valor es de 4.67 mL/L para esta época (Cuadro 1).

Los perfiles latitudinales con profundidad a través de 87°W, se muestran en la Figura 5. Aunque la estructura fina de la temperatura en la capa superficial de agua (Fig. 5A) no se define muy bien con la interpolación del programa usado, si se nota un leve domo térmico a los 10°N y un gradiente horizontal de temperatura hacia el sur que alcanza los 5°N (Isla del Coco). El perfil de salinidad (Fig. 5B) muestra una depresión con el mínimo centrado alrededor de la Isla del Coco. Es perceptible la intrusión de masas sub-superficiales de agua de mayor salinidad desde el norte y también desde el sur. Un mayor gradiente se nota desde el sur con un máximo de salinidad a los 300 m y que alcanza al menos los 2°N. Wyrki (1966, 1967) identifica a esta cuña de agua como Aguas Superficiales Subtropicales (ASS). El perfil de oxígeno disuelto (Fig. 5C), muestra un mínimo alrededor de los 800 m de profundidad sobre los 11°N, mínimo que se extiende hacia el sur a esa profundidad hasta alcanzar al menos el Ecuador. Wyrki (1966, 1967) relaciona este mínimo al alto consumo de oxígeno en esos estratos y el largo tiempo de residencia de esas aguas. Las concentraciones de los fosfatos, nitratos y silicatos muestran todas un domo sobre el borde norte con una inclinación de las isolíneas (gradiente) hacia el sur, cuya pendiente se nota aún más allá del ecuador (Figs. 5D, E, F). Estos valores son consistentes con los valores típicos en las capas sub-superficiales de los océanos (Orsi & Whitworth III 2005).

C-3. Distribución espacial superficial de temperatura, salinidad, altura dinámica y profundidad de la capa de mezcla con la ZCIT más al norte: Para el trimestre de julio a setiembre el PTE es una piscina cálida al norte de los 5°N de poca variación espacial (Fig. 6A) (Magaña *et al.* 1999, Wang & Enfield 2002,

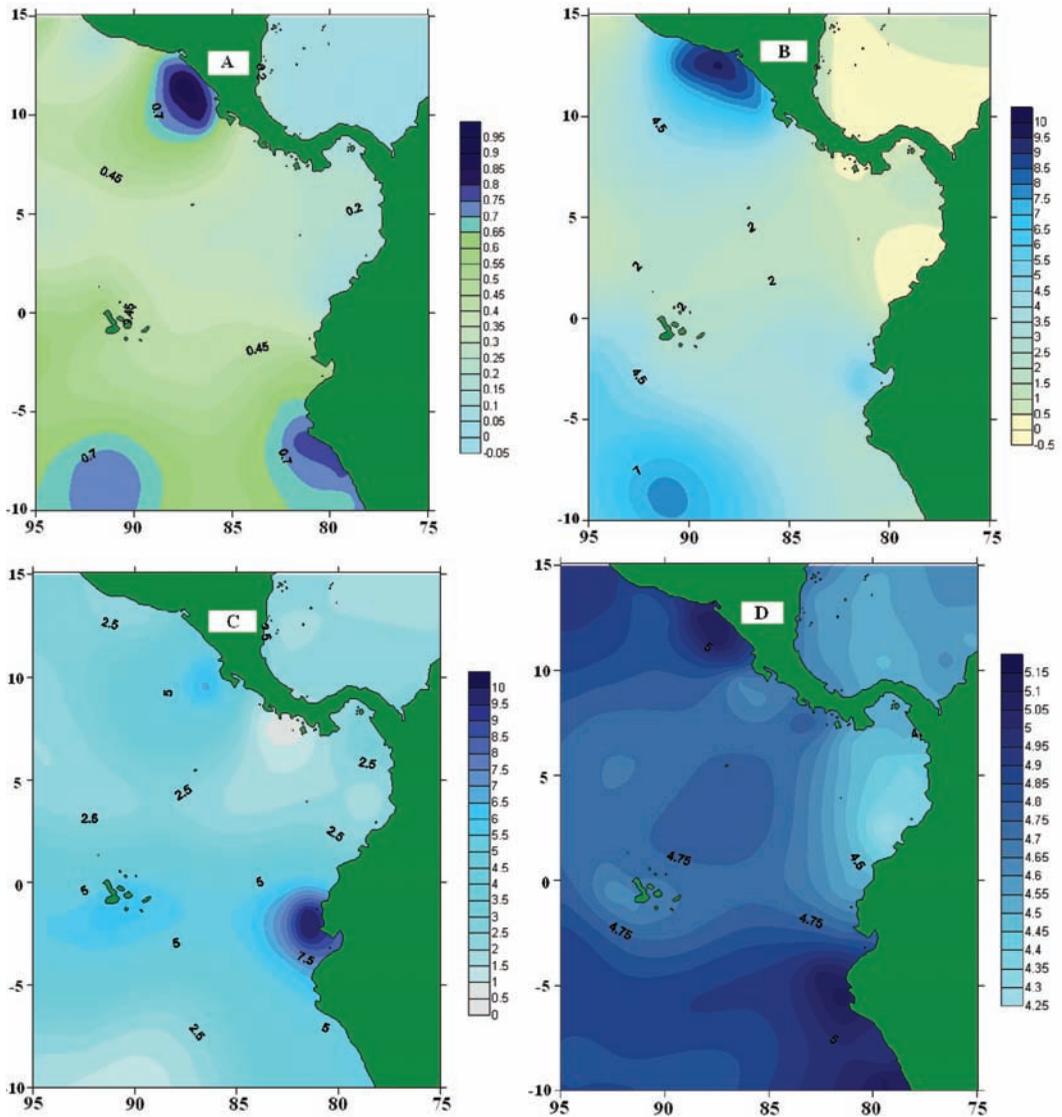


Fig. 4. Promedios trimestrales (Enero-Marzo) en la superficie del océano de: A) PO_4 , B) NO_4 , C) SiO_4 , D) O_2 en el Pacífico Tropical Este.

Fig. 4. Quarterly averages (January-March) in the surface spatial distribution of: A) PO_4 , B) NO_4 , C) SiO_4 , and D) O_2 in the eastern tropical Pacific.

Amador *et al.* 2006), producto de la mayor radiación solar en estos meses (Magaña *et al.* 1999, Amador *et al.* 2006). El mínimo de salinidad superficial se mantiene, pero más restringido hacia la costa de Colombia (Fig. 6B). En esta época se alcanza los mayores valores de salinidad superficial alrededor de la isla

ups) y el mínimo de salinidad al sur del Golfo de Panamá (30.8 ups, Cuadro 1, Fig. 6B). La Figura 6C muestra que la isla aún está sobre un dorsal de altura dinámica cuya proyección hacia el este aumenta hasta valores de 166 m al frente de la costa de Colombia. Para esta época, la región de valores mínimos de la profundidad

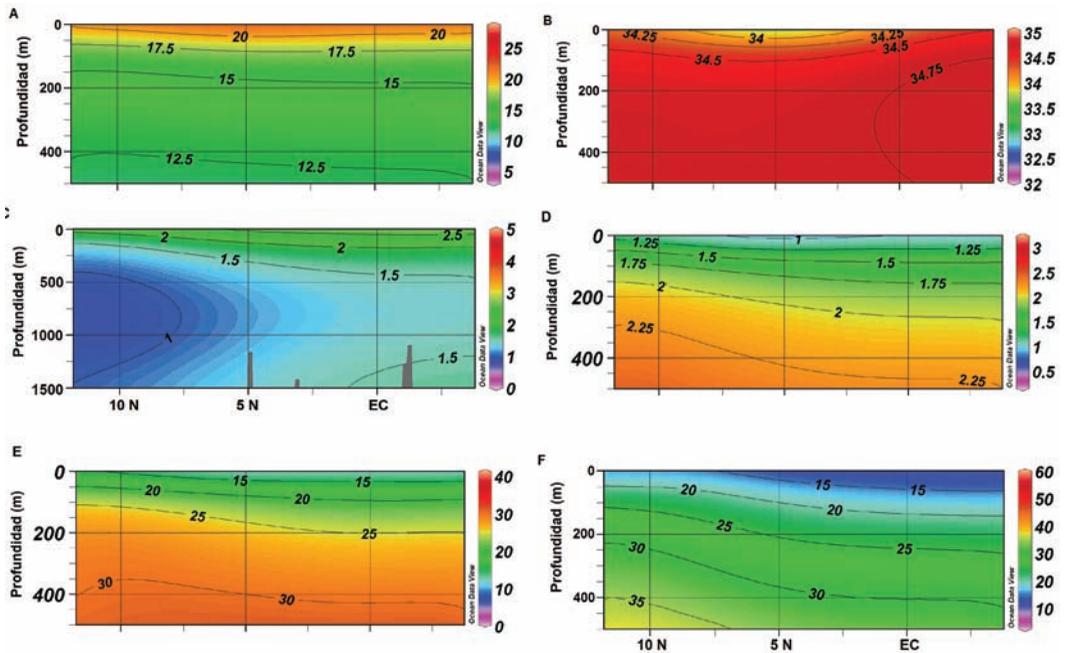


Fig. 5. Perfiles latitudinales a lo largo de 87°W, atravesando la Isla del Coco en Marzo de: A) temperatura, B) salinidad, C) oxígeno disuelto, D) fosfatos, E) nitratos y F) silicatos en el Pacífico Tropical Este.

Fig. 5. Latitudinal profiles along 87°W and crossing Isla del Coco in March: A) temperature, B) salinity, C) dissolved oxygen, D) phosphates, E) nitrates, and F) silicates in the eastern tropical Pacific.

de la capa de mezcla (0-5 m) es más reducida y restringida sobre la costa de Centroamérica y Colombia (Fig. 6D). Mayores valores se notan al sur de 5°N, con máximos de 65 m a los 10°S y 80-95°W. El afloramiento frente a Ecuador-Perú es más intenso en esta época que durante el primer trimestre del año (Fig. 6). Sin embargo, observando las distribuciones espaciales superficiales de estos parámetros, no se evidencia, en ese promedio trimestral, una advección superficial desde esta región hacia la Isla del Coco. Un frente o fuerte gradiente horizontal para la mayoría de estas variables se puede observar alrededor del ecuador.

C-4. Distribución espacial de nutrimentos y oxígeno disuelto con la ZCIT más al norte: Se nota que en esta época hay menores concentraciones en los fosfatos, nitratos, silicatos, y el oxígeno disuelto alrededor de la isla (Cuadro 1, Fig. 7). Hay más altas concentraciones

en el afloramiento de Ecuador-Perú, pero aún, desde el alcance de la pluma superficial de estos compuestos, no se nota la advección sobre la isla. Es identificable sin embargo, un afloramiento de nitratos al frente del Golfo de Papagayo cuya influencia todavía alcanza a la Isla del Coco (Fig. 7B).

Los perfiles latitudinales a lo largo de 87°W (Fig. 8) presentan una columna de agua con una estructura térmica (Fig. 8A) muy uniforme (contornos paralelos) de temperatura desde los 11°N hasta los 3°N. Al partir de allí se nota una pendiente positiva hacia el Ecuador (gradiente hacia el norte) en los contornos de temperatura. La Figura 8B muestra una cuña de agua más salina desde el sur con un máximo que aumenta con profundidad hacia el norte y que alcanza al menos las latitudes de la Isla del Coco (5°N). La Figura 8C indica siempre un mínimo de oxígeno disuelto sobre los 11°N y centrado alrededor del 750 m de profundidad,

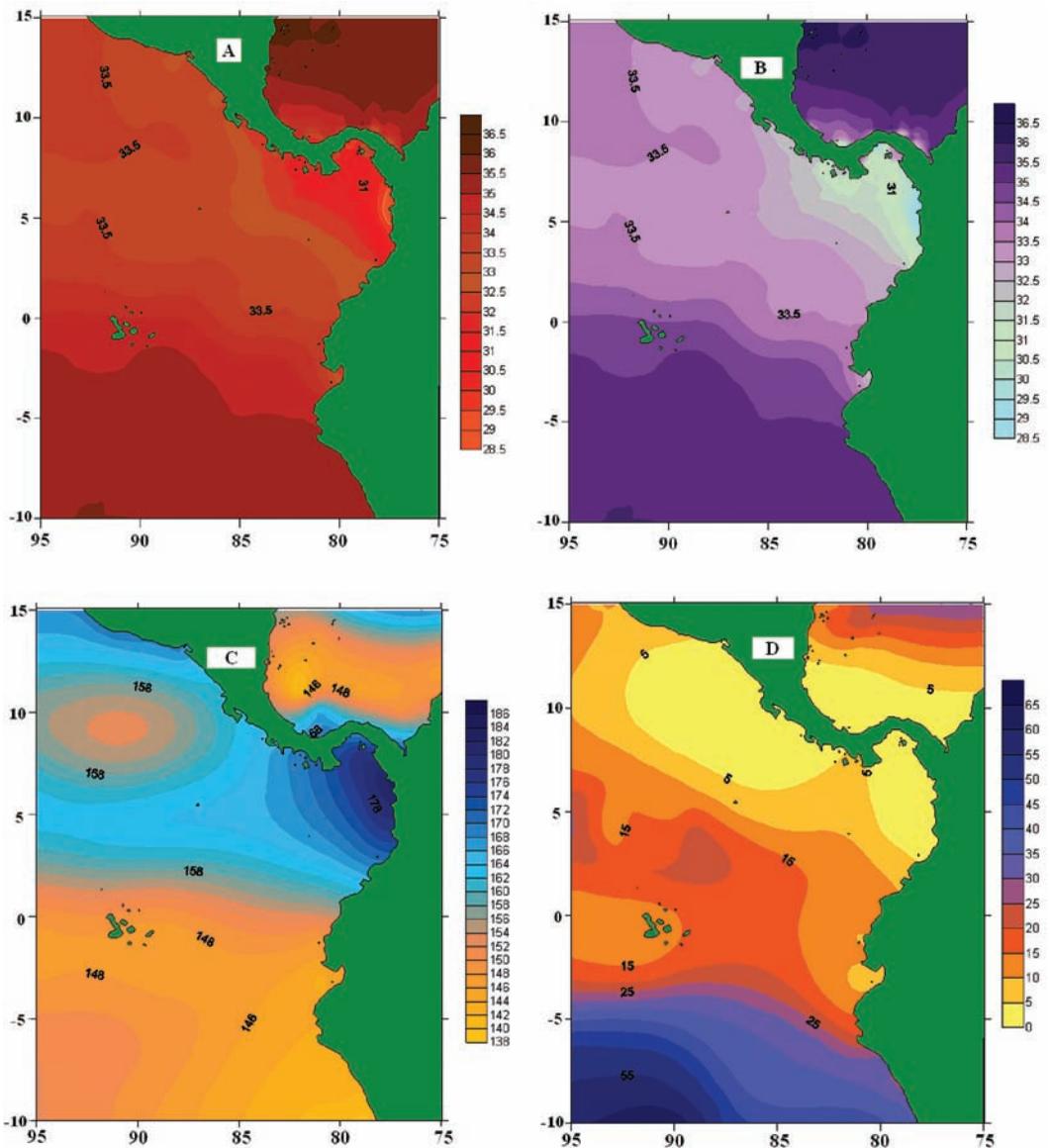


Fig. 6. Promedios trimestrales (Julio-Setiembre) en la superficie del océano de la distribución espacial de: A) TSM, B) SSM, C) AD, D) PCM en el Pacífico Tropical Este.

Fig. 6. Quarterly averages (July-September) in the surface spatial distribution of: A) Sea Surface Temperature, B) Sea Surface Salinity, C) Dynamic Height of the sea, and D) Depth of the Mixing Zone in the eastern tropical Pacific.

mínimo que también se extiende hacia el sur, pasando incluso el Ecuador en este caso. Las concentraciones de los fosfatos, nitratos, silicatos (Figs. 8D, E, F) señalan aún un domo alrededor de los 10°N, pero con un menor gradiente

con profundidad que el mostrado durante el primer trimestre del año. Al sur de los 2°N estos perfiles se observa una pendiente o inclinación de las isolíneas hacia arriba (o gradiente hacia el norte) desde el afloramiento Ecuador-Perú.

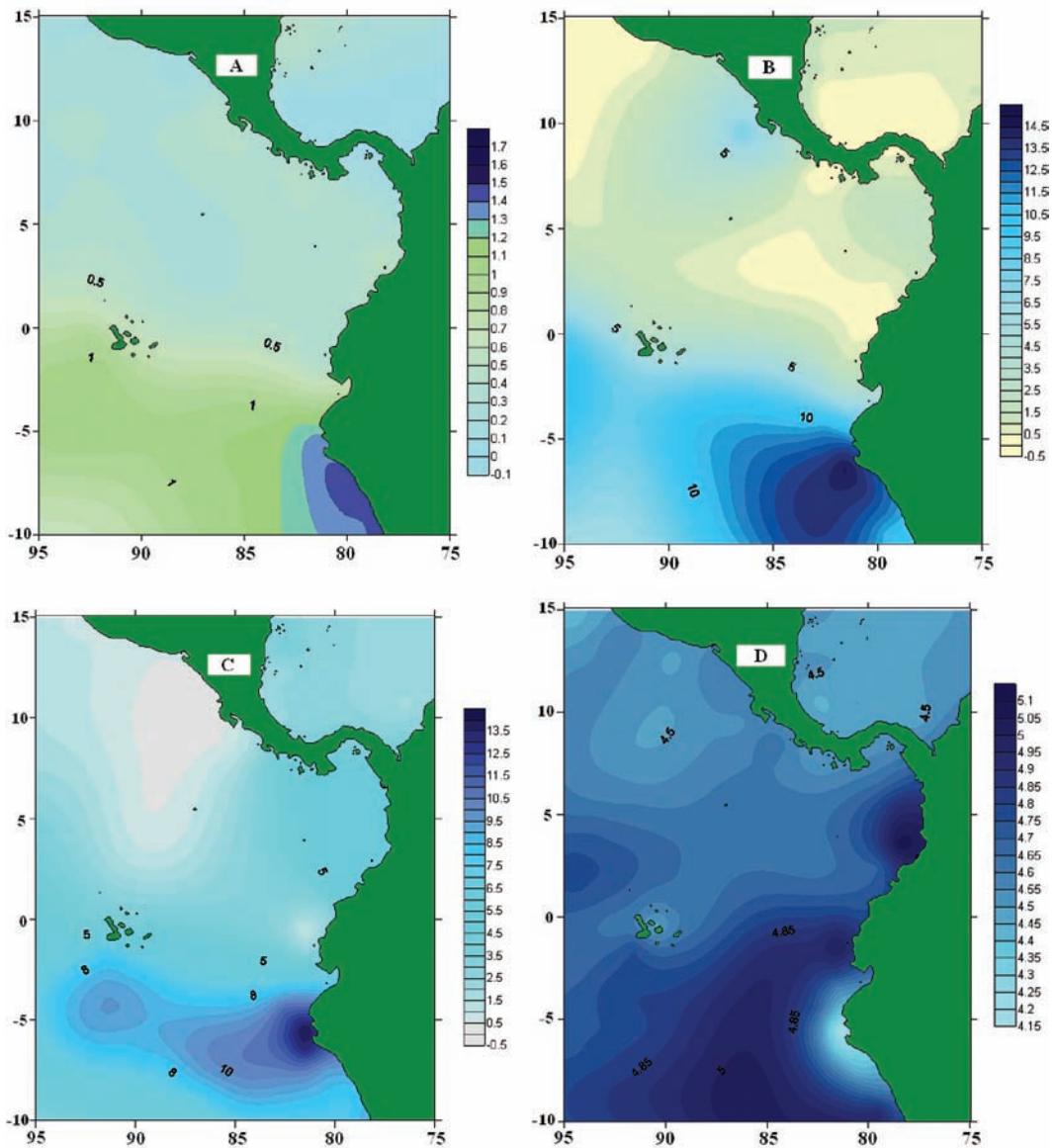


Fig. 7. Promedios trimestrales (Julio-Setiembre) en la superficie del océano de: A) PO₄, B) NO₄, C) SiO₄, D) O₂ en el Pacífico Tropical Este.

Fig. 7. Quarterly averages (July-September) in the surface spatial distribution of: A) PO₄, B) NO₄, C) SiO₄, and D) O₂ in the eastern tropical Pacific.

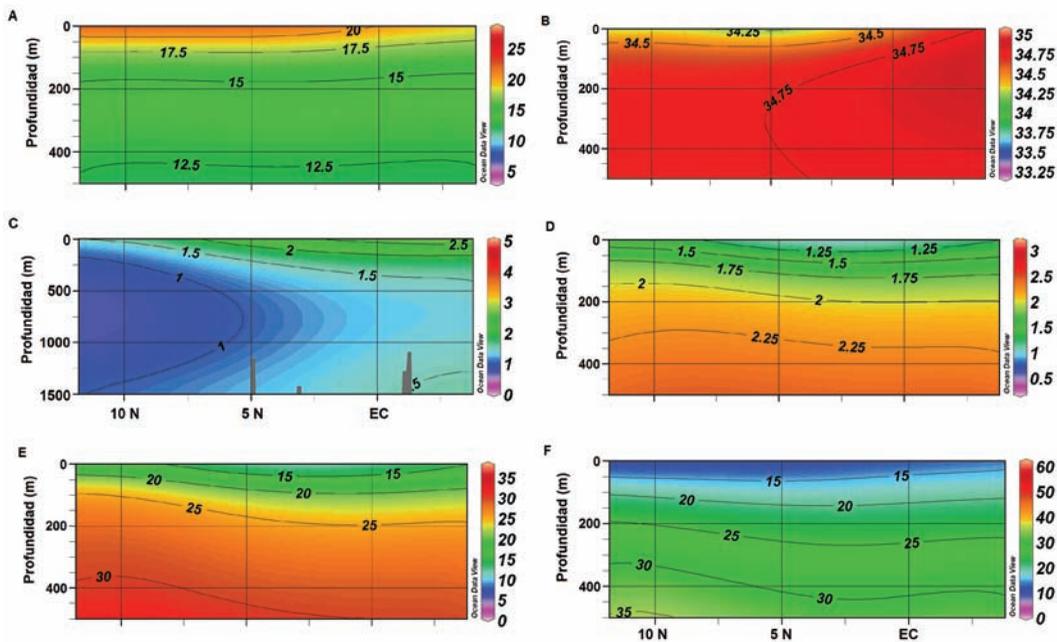


Fig. 8. Perfiles latitudinales a lo largo de 87°W atravesando la Isla del Coco en Setiembre de: A) temperatura, B) salinidad, C) O₂, D) PO₄, E) NO₄ y F) SiO₄ en el Pacífico Tropical Este.

Fig. 8. Latitudinal profiles along 87°W and crossing Isla del Coco in September: A) temperature, B) salinity, C) O₂, D) PO₄, E) NO₄, and F) SiO₄ in the eastern tropical Pacific.

D. Climatología de viento y oleaje: La distribución espacial del viento en la PTE, como ya se ha señalado, es modificada por el desplazamiento anual de la ZCIT. Cuando la ZCIT está más sur, los vientos alisios del norte soplan fuerte sobre el Caribe Centroamericano, proyectándose sobre el Pacífico a través de los pasos topográficos de Tehuantepec, Papagayo y el Golfo de Panamá (Fig. 9A) (Legeckis 1988, Amador *et al.* 2006). Entre diciembre y marzo, la componente del viento, específicamente en la Isla del Coco (Fig. 9A), es más zonal. Por otro lado también, el oleaje generado por este viento alisio frente a la costa Pacífica de Centroamérica, modifica el oleaje remoto que viene desde el suroeste y alcanza a la isla. Como consecuencia, la altura promedio de las olas disminuye en esta época (Fig. 9B), modificando también sus direcciones promedio, siendo éstas con una mayor componente oeste (oeste-suroeste) (Fig. 9C). Aunque en promedio

siempre el oleaje que alcanza la isla es desde el suroeste (Fig. 9D), en esta época las tormentas en el Pacífico norte del planeta, generan oleaje con suficiente energía como para alcanzar la Isla del Coco desde el noroeste (Amador *et al.* 2006, Lizano en prensa).

Cuando la ZCIT está más al norte, el patrón de viento cambia, y la isla es más bien alcanzada por vientos alisios desde el sur, que se transforman en los vientos oeste ecuatoriales (Fig. 8B) al cruzar el Ecuador (Zarate 1978, Lizano en prensa). La generación de olas para esta época es desde el Pacífico sur de nuestro planeta (Amador *et al.* 2006, Lizano en prensa) y alcanzan la isla más bien desde el sur-suroeste (Fig. 9D). Las alturas promedio de las olas aumenta (Fig. 9B) en este caso.

Los períodos de las olas son más bajos entre enero y febrero. Esto está relacionado con la presencia de vientos alisios en el Pacífico y la generación de oleaje local (mar de viento),

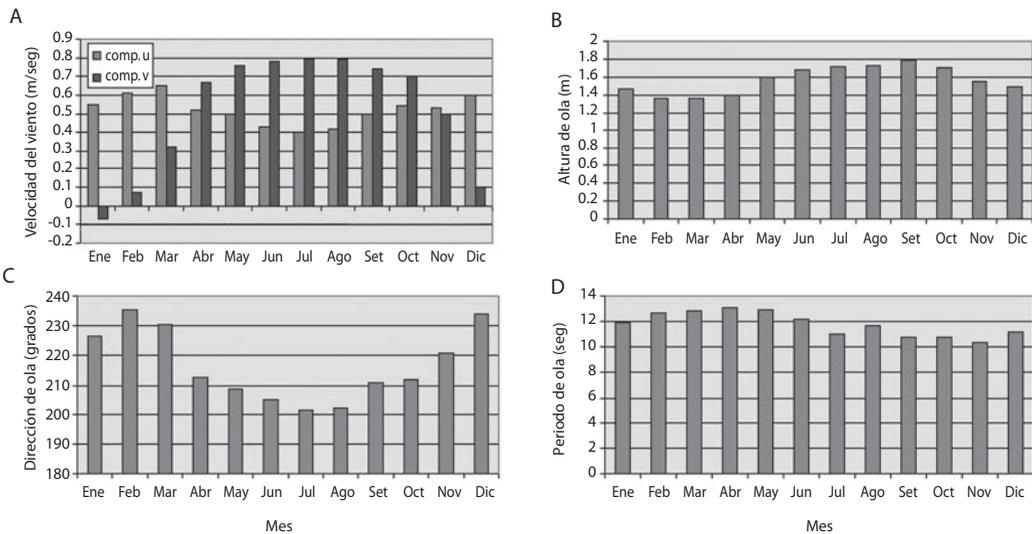


Fig. 9. Climatología mensual de: A) componente zonal y meridional del viento, B) altura y C) dirección de ola alrededor de Isla del Coco. D) Resultados de re-análisis del período (1997-2004) del modelo de pronóstico de oleaje WAVEWATCH III de NCEP-NOAA.

Fig.9. Monthly climatology of: A) zonal and meridional component of the wind, B) height, and C) wave direction around Isla del Coco. D) Results of re-analysis of the period (1997-2004) of the wave forecasting model WAVEWATCH III (NCEP-NOAA).

cuya característica son períodos cortos Lizano (2007). Este oleaje modifica el promedio de los períodos más largos de la marejada entrante desde el Pacífico Sur del planeta Lizano (2007). Los períodos promedio de las olas son más largos entre marzo y mayo (Fig. 9C) cuando comienzan a generarse las tormentas de otoño-invierno en el Pacífico Sur del planeta y que alcanzan la isla como marejada de fondo Lizano (2007). Son menores entre setiembre y noviembre, cuando hay predominancia de tormentas locales gestadas en el PTE, cuya característica también es la generación de oleaje local (mar de viento) con períodos más cortos. Es evidente el efecto del veranillo en julio, el cual genera de mar de viento local (oleaje caótico con menor período de ola) desde la proyección de los vientos desde el Caribe hacia el Pacífico.

DISCUSIÓN

La dinámica del PTE durante el primer trimestre del año cuando la ZCIT está más al norte, es básicamente manejado por la estructura superficial del viento, cuyo rotacional ejerce movimientos ciclónicos y anticiclónicos sobre la superficie del mar (Brenes *et al.* 1995, Kessler 2006). Sobre el océano se establece un sistema de corrientes en equilibrio geostrofico (Fiedler 1992, Kessler 2006) sobre esta región (Fig. 2A), acorde con las estructura superficial de la TSM, SSM y AD (Figs. 3A, B, C). Las aguas superficiales en este trimestre tienen un giro anticiclónico con la isla prácticamente en su centro. Está inmersa en un dorsal de mayor temperatura, baja salinidad y gran altura dinámica, rodeada al norte y al sur por aguas más frías y salinas de las depresiones de los

afloramientos del DTCR y de Ecuador-Perú (Fig. 3, Cuadro 1). La alta radicación solar y altas precipitaciones sobre el PTE para estas épocas (Wyrтки 1966, Amador *et al.* 2006, Fiedler & Talley 2006), son las que determinan estas características. Las aguas constituyen las así llamadas Aguas Superficiales Tropicales (AST) (Wyrтки 1965, Brenes *et al.* 1995) que son claramente distinguibles de las aguas al norte y al sur (Willet *et al.* 2006).

Las distribuciones superficiales de nutrientes en este primer trimestre del año (Fig. 4) muestran una advección sobre la isla desde el afloramiento frente al Golfo de Papagayo de Costa Rica y no desde el afloramiento de Ecuador-Perú. Las condiciones batimétricas son más favorables al noreste de la isla (mayores profundidades, Fig. 1B) para esta advección. Esto es reforzado por los perfiles longitudinales

con profundidad de los nutrientes y oxígeno disuelto (Fig. 5). Aunque Wyrтки (1965) indica que la Isla del Coco es alcanzada por la corriente de Perú cuando la ZCIT está más al sur (abril), mencionado también en Kessler (2006), desde los datos mensuales que se han analizado para este artículo, no resulta evidencia clara de que esto sea así. Es posible que en eventos extremos desde el Hemisferio Sur y en períodos cortos, esto se pueda dar, pero que no se ven reflejados por supuesto, en un promedio mensual y menos aún, en un promedio trimestral. Se realizó un análisis adicional para apoyar este criterio, calculando el perfil promedio mensual de la componente norte de las corrientes geostóficas a través de la Isla del Coco. En ninguno de estos promedios se evidenció un transporte desde el sur en la columna de agua. El perfil promedio trimestral (Fig. 10A) es

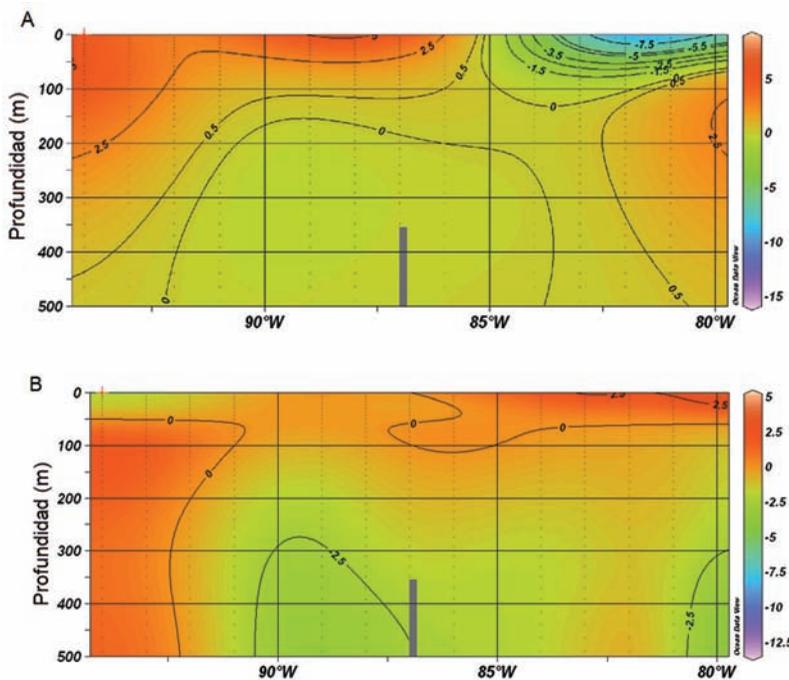


Fig. 10. Promedios trimestrales de perfiles longitudinales a lo largo de 5.5°N de la componente norte de las corrientes geostóficas (referidas al nivel de 500 m) entre: A) Enero-Marzo y B) Julio-Setiembre. Valores positivos significa corriente hacia el norte y negativos corrientes hacia el sur.

Fig. 10. Quarterly average of longitudinal profiles along 5.5°N of the north component of the geostrophic currents (referred to the 500 m depth): A) January-March, and B) July-September. Positive values indicate a flow towards the north and negative values toward the south.

coherente con la distribución de las corrientes superficiales (circulación anticiclónica) (Fig. 2A). Al oeste de los 85°W se genera un flujo hacia el norte. Hacia el este de los 85°W hay un flujo fuerte hacia el sur que alcanza hasta los 100 m de profundidad. Sobre la columna de agua alrededor de la Isla del Coco se indican valores bajos de la magnitud de la corriente, y más bien su dirección indica hacia el sur debajo de los 100 m de profundidad. Se identifica también una corriente con componente sur, sobre los 300-400 m a los 89-90°W.

A partir de mayo la CCEN comienza a ser evidente en el PTE (Wyrski 1965, Anónimo 1994) y la isla se sitúa sobre el borde sureste de la máxima intensidad de esta corriente que alcanza los 87-90°W y 6-7°N, condición que prevalece para el resto del año (Figs. 2B, C, D). Siguen siendo consistentes estas corrientes con el balance geostrófico derivado de la altura dinámica (Fig. 6C), es decir, al norte de este dorsal se mantiene un giro ciclónico centrado aproximadamente sobre los 10°N, y al sur, un giro anticiclónico, que sobre el ecuador geográfico es alcanzado por las corrientes que se generan desde el Hemisferio Sur. Los vientos alisios disminuyen (Amador *et al.* 2006, Lizano en prensa) y el afloramiento de Papagayo desaparece para esta época.

Cuando la ZCIT está más al norte, el PTE se transforma en una piscina cálida (Magaña *et al.* 1999, Wang & Enfield 2002, Amador *et al.* 2006), producto de la mayor radiación solar en estos meses. Se generan también, las menores salinidades superficiales debido a las altas precipitaciones sobre El Chocó de Colombia (Amador *et al.* 2006), valores que constituyen la menor salinidad de los océanos tropicales (Fiedler & Talley 2006). En esta época el afloramiento desde Ecuador-Perú es más intenso (Fig. 6), mostrando aguas más frías y salinas al sur del Ecuador (Aguas Superficiales Subtropicales: ASST, Wyrski 1967). Sin embargo, a pesar del fuerte gradiente horizontal sobre el Ecuador de estos parámetros que generan un frente oceánico (Wyrski 1966; De Szoeké & Xie 2007), gradiente que también se nota en la distribución superficial de nutrientes (Fig.

7), no se muestra un transporte hacia la isla a nivel superficial. Esto también es reforzado desde el análisis de los perfiles latitudinales de nutrientes y oxígeno disuelto (Fig. 8).

Aunque para esta época se nota un gradiente fuerte o una cuña de agua salina que alcanza los niveles sub-superficiales de las latitudes de la isla desde el sur (Fig. 8B), el análisis de los promedios mensuales de la componente norte de las corrientes geográficas (Fig. 10B), no indican un flujo en esta dirección. Más bien a profundidad de 200-500 m se indican máximos de estas corrientes con componente sur al oeste de la isla (89°W) y también sobre el extremo este (80°W), frente a la costa de Colombia.

La distribución espacial del viento en la PTE, como ya se ha señalado, es modificada por el desplazamiento anual de la ZCIT. Cuando la ZCIT está más al sur, los vientos alisios del norte soplan fuerte sobre el Caribe Centroamericano, proyectándose sobre el Pacífico a través de los pasos topográficos de Tehuantepec, Papagayo y el Golfo de Panamá (Legeckis 1998, Amador *et al.* 2006), influencia que puede alcanzar la Isla del Coco, como señala Kessler (2006). Desde los pronósticos de modelos de oleaje que se revisan semanalmente en el Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR) de la Universidad de Costa Rica, se ha encontrado que durante eventos fuertes de los alisios en el Caribe, el viento y el oleaje generados bajo esta condición, alcanzan la isla Lizano (2007). Entre diciembre y marzo, la componente del viento específicamente en la Isla del Coco (Fig. 9A), es más zonal dada la influencia de estos vientos alisios, resultados que concuerdan con los datos observados en la isla (Alfaro 2008). Por otro lado también, el oleaje generado por este viento alisio frente a la costa Pacífica de Centroamérica, modifica el oleaje remoto que alcanza la isla normalmente desde el suroeste Lizano (2007). Como consecuencia, la altura promedio de las olas disminuye en esta época (Fig. 7B), modificando también sus direcciones promedio, siendo éstas con una mayor componente oeste (Fig. 9C). Para esta época también, las tormentas en el Pacífico norte de nuestro

planeta (Amador *et al.* 2006, Lizano en prensa) generan oleaje con suficiente energía para alcanzar en promedio la isla.

Cuando la ZCIT está más al norte, el patrón de viento cambia y la isla es más bien alcanzada por vientos alisios desde el sur, que se transforman en los vientos oeste ecuatoriales al cruzar el Ecuador (Zarate 1978, Lizano en prensa). Para esta época las alturas promedio de las olas aumenta (Fig. 9B), y su dirección es también modificada, con una componente sur más acentuada (Fig. 9C). Los períodos promedio de las olas son menores entre setiembre y noviembre, cuando hay predominancia de tormentas locales gestadas en el PTE, cuya característica es la generación de oleaje con períodos más cortos (Fig. 9D). Las alturas promedio de las olas aumenta (Fig. 9B) dada la energía adicional que pueden tener las olas desde los oeste ecuatoriales.

AGRADECIMIENTOS

A la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica por el financiamiento de los proyectos: No. 808-A6-050, 808-A6-053 y 808-A7-401. Por la revisión a tres revisores anónimos y a Jenaro Acuña.

RESUMEN

Se analizan datos climatológicos superficiales y sub-superficiales usando parámetros físicos y químicos, nutrientes y oxígeno disuelto sobre el Pacífico Tropical Este, algunos resultados de bases de datos, y otros de modelos numéricos y observaciones satelitales. El patrón de las corrientes marinas superficiales durante el primer trimestre del año es distinto al del resto del año. La Contracorriente Ecuatorial del Norte no alcanza la isla en esta época, y más bien se forma un giro anticiclónico centrado alrededor de la Isla del Coco, con una corriente intensa que se genera en la costa al sur desde el Golfo de Panamá, y se dirige primero al sur y luego al oeste. Es en esta época cuando la Zona de Confluencia Intertropical está al norte, y la dinámica del Pacífico Tropical Este es manejada por el esfuerzo del viento alisio del Caribe que pasa a través de los pasos topográficos de Centroamérica. El afloramiento frente al Golfo de Papagayo es evidente y desde las distribuciones superficiales espaciales de temperatura, salinidad y nutrientes, se identifica una advección hacia la Isla del Coco desde esta región. Cuando la Zona de Confluencia

Intertropical está al sur, el afloramiento frente al Golfo de Papagayo desaparece, los vientos alisios del sur se intensifican y el afloramiento de Ecuador-Perú se muestra más intenso. Sin embargo, desde las distribuciones espaciales y latitudinales de parámetros físicos y de nutrientes, no se encuentra advección, en los promedios mensuales, desde el afloramiento de Papagayo. Para esta época, la isla es siempre alcanzada por la Contracorriente Ecuatorial del Norte. En promedio, las olas que llegan a la Isla del Coco vienen del suroeste. Sin embargo, durante el invierno boreal en el Hemisferio Norte, las tormentas generan olas con la suficiente energía para alcanzar la isla desde el noroeste. Para esta época también, los vientos alisios provenientes del Caribe soplan fuertemente a través de los pasos topográficos del Golfo de Papagayo y el Golfo de Panamá, y producen un oleaje con dirección suroeste, el cual puede alcanzar la isla y disminuye la energía del oleaje remoto que viene desde el suroeste y llega usualmente a esta región.

Palabras claves: Pacífico Tropical este, nutrientes, corrientes superficiales, perfiles latitudinales, Isla del Coco, Costa Rica

REFERENCIAS

- Acuña-González, J., J. García-Céspedes, E. Gómez-Ramírez, J.A. Vargas-Zamora & J. Cortés. 2008. Algunas observaciones sobre parámetros físico-químicos en aguas costeras de la Isla del Coco, Costa Rica (2001-2007). *Rev. Biol. Trop.* 56 (Supl. 2): 49-56.
- Alfaro, E.J. 2008. Ciclo diario y anual de variables troposféricas y oceánicas en la Isla del Coco, Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.* 56 (Supl. 2): 19-29.
- Amador, J., E.J. Alfaro, O.G. Lizano & V. Magaña. 2006. Atmospheric forcing in the Eastern Tropical Pacific. *Progr. Oceanogr.* 69: 101-142.
- Anónimo. 1947. Atlas of surface currents for the northeastern Pacific Ocean. U.S. Hydrographic Office. H.O. 570. Washington, D.C., E.U.A.
- Anónimo. 1994. Atlas of Pilot Charts, North Atlantic Ocean. Defense Mapping Agency, Secretary of Defense, Washington DC, E.U.A. 37 p.
- Badan-Dangon, A. 1998. Chapter 11. Coastal circulation from the Galápagos to the Gulf of California, p 315-343. *In* A.R. Robinson & K.H. Brink (eds.). *The Sea*. John Wiley, Nueva York.
- Brenes, C.L., B. Kwiecinski, L. D'Croz & J. Chaves. 1995. Características oceanográficas de la plataforma Pacífica de América Central y aguas oceánicas adyacentes. Convenio ALA/90/09 UE/OLDEPESCA. PRADEPESCA. Programa Regional de Apoyo al Desarrollo de la Pesca en el Istmo Centroamericano. 27 p.

- Castillo, P., R. Batiza, D. Vanko, E. Malavassi, J. Barquero & E. Fernández. 1988. Anomalously young volcanoes on old hot-spot traces: I. Geology and petrology of Cocos Island. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 100: 1400-1414.
- Clarke, A.J. 1988. Inertial wind path and sea surface temperature patterns near the Gulf of Tehuantepec and Gulf of Papagayo. *J. Geophys. Res.* 93: 15491-15501.
- Conkright, M.E., S. Levitus & T.P. Boyer. 1994. World Ocean Atlas, Volume 1: Nutrients. NOAA Atlas NESDIS 1. U.S. Department of Commerce, Washington, D.C., E.U.A. 150 p.
- Conkright, M.E., R.A. Locarnini, H.E. Garcia, T.D. O'Brien, T.P. Boyer, C. Stephens & J.I. Antonov. 2002. World Ocean Atlas 2001: Objective Analyses, Data Statistics, and Figures, CD-ROM Documentation. National Oceanographic Data Center, Silver Spring, Maryland, E.U.A. 17 p.
- De Szoek, S.P. & S.P. Xie. 2007. What maintains the SST front north of the Eastern Pacific Equatorial cold tongue? *J. Climate* 20: 2500-2514.
- Fiedler, P.C. 1992. Seasonal climatologies and variability of eastern tropical Pacific surface waters. NOAA Tech. Rep. NMFS 109: 65 p.
- Fiedler, C.P. 1994. Seasonal and interannual variability of coastal zone color scanner phytoplankton pigments and winds in the eastern tropical Pacific. *J. Geophys. Res.* 99: 18371-18384.
- Fiedler, P.C. 2002. The annual cycle and biological effects of the Costa Rica Dome. *Deep-Sea Res.* I 49: 321-338.
- Fiedler, P.C. & L.D. Talley. 2006. Hydrography of the eastern tropical Pacific: A review. *Progr. Oceanogr.* 69: 143-180.
- Fiedler, P.C., V. Philbrick & F.P. Chavez. 1991. Oceanic upwelling and productivity in the eastern tropical Pacific. *Limnol. Oceanogr.* 36: 1834-1850.
- Glynn, P.W. & J.S. Ault. 2000. A biogeographic analysis and review of the far eastern Pacific coral reef region. *Coral Reefs* 19: 1-23.
- Knauss, J.A. 1978. Introduction to Physical Oceanography. Prentice-Hall, Nueva York, Nueva York. 338 p.
- Kessler, W.S. 2006. The circulation of the eastern Pacific: A review. *Progr. Oceanogr.* 69: 181-217.
- Legeckis, R. 1998. Upwelling off the Gulf of Panama and Papagayo in the tropical Pacific during March 1985. *J. Geophys. Res.* 93: 15485-15489.
- Levitus, S. & T.P. Boyer. 1994. World Ocean Atlas, Volume 2: Oxygen. NOAA, Atlas NESDIS 2. U.S. Department of Commerce, Washington, D.C., E.U.A. 186 p.
- Lizano, O.G. 2001. Batimetría de la plataforma insular alrededor de la Isla del Coco, Costa Rica, Centro América. *Rev. Biol. Trop.* 49 (Supl. 2): 163-170.
- Lizano, O.G. 2007. Climatología del viento y oleaje frente a las costas de Costa Rica. *Ciencia y Tecnología.* 25 (en prensa).
- Magaña, V.O., J.A. Amador & S. Medina. 1999. The mid-summer drought over Mexico and Central America. *J. Climate* 12: 1577-1588.
- Orsi A.H. & T. Whitworth III. 2005. Hydrographic Atlas of the World Ocean Circulation Experiment (WOCE). Volumen 1: Southern Ocean. M. Sparrow, P. Chapman & J. Gould (Eds.) Internacional WOCE Project Office, Southampton, Reino Unido.
- Umatani, S. & T. Yamagata. 1991. Response of the Eastern Tropical Pacific to meridional migration of the ITCZ: the generation of the Costa Rica Dome. *J. Phys. Oceanogr.* 21: 346-363.
- Wang, C. & D.B. Enfield. 2002. A further study of the tropical western hemisphere warm pool. *J. Climate* 16: 1476-1493.
- Willet, C.S., R.R. Leben & M. Lavín. 2006. Eddies and tropical instability waves in the eastern tropical Pacific: A review. *Progr. Oceanogr.* 69: 218-238.
- Wyrtki, K. 1964. Upwelling in the Costa Rica Dome. *Fish. Bull.* 63: 355-372.
- Wyrtki, K. 1965. Surface currents of the Eastern Tropical Pacific Ocean. *Inter-American Tropical Tuna Commission IX(5):* 271-304.
- Wyrtki, K. 1966. Oceanography of the eastern equatorial Pacific Ocean. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.* 4: 33-68.
- Wyrtki, K. 1967. Circulation and water masses in the eastern equatorial Pacific Ocean. *Int. J. Oceanol. Limnol.* 1: 117-147.
- Zárate, E. 1978. Comportamiento del viento en Costa Rica. Nota de Investigación No. 2. Instituto Meteorológico Nacional, San José, Costa Rica. 31 p.