

Rasgos oceanográficos en el Golfo Dulce, Pacífico de Costa Rica: una revisión para la toma de decisiones en conservación marina

Álvaro Morales-Ramírez^{1,2}, Jenaro Acuña-González^{1,3}, Omar Lizano^{1,4,5}, Eric Alfaro^{1,4,5} & Eddy Gómez^{1,3,6}

1. Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR), Universidad de Costa Rica, 11501-2060 San José, Costa Rica.
2. Escuela de Biología, Universidad de Costa Rica, 11501-2060 San José, Costa Rica; alvaro.morales@ucr.ac.cr
3. Escuela de Química, Universidad de Costa Rica, 11501-2060 San José, Costa Rica; jenaro.acuna@ucr.ac.cr, eddy.gomez@ucr.ac.cr
4. Escuela de Física, Universidad de Costa Rica, 11501-2060 San José, Costa Rica; erick.alfaro@ucr.ac.cr, omar.lizano@ucr.ac.cr
5. Centro de Investigaciones Geofísicas, Universidad de Costa Rica, 11501-2060 San José, Costa Rica.
6. Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Universidad de Cádiz.

Recibido 11-VIII-2014. Corregido 20-XI-2014. Aceptado 22-XII-2014.

Abstract: Oceanographic features of Golfo Dulce, Costa Rican Pacific: a review for decision-making in marine conservation. From September 2005 to November 2007 we studied the meteorological typologies and the physical, chemical and zooplankton oceanography of Golfo Dulce, a unique aquatic ecosystem in the South Pacific of Costa Rica. The water circulation pattern in Golfo Dulce is typical of fjord-type estuaries, with flux stratification within the water column. Surface water currents reached speeds near 18cm/s in the vicinity of the sill and diminished inward to the northwest at around 5cm/s. The east-west flux was predominant, whereas near Puerto Jiménez the speed was a moderated 5.4cm/s with a south direction. Higher speeds were found near the sill (17.8cm/s) and at the bottom (2.0cm/s to 4.8cm/s). One station was visited once, five were visited five times each. Dissolved oxygen was not absent in deep waters (70m to 140m), but concentrations were low (0.25mg/L to 1.10mg/L). Nutrient concentrations and distribution had the usual horizontal estuarine patterns and for the vertical level phosphate and silicate concentrations increased with depth. Decomposition of organic matter was evident because nitrate concentrations were higher in deep waters. Surface nutrient concentrations indicated the gulf has good environmental quality that sustains a variety of life. Copepods dominated zooplankton (44%-83.6%). The strongest equatorial westerlies were detected between September and October, coincident with higher wave heights. The trade winds blowing from December to April reduced the energy of entering waves and therefore the mean wave height. The annual rainfall cycle was the typical bimodal pattern from the Central America Pacific, with maxima in May and October, except for the midsummer interruption, and minimum rain was on February. Golfo Dulce is a unique environment in the Eastern Tropical Pacific, shows healthy environmental conditions, and is threatened; therefore we urge the establishment of zoning policy for human activities, and to improve protection under the principles of sustainable use. *Rev. Biol. Trop.* 63 (Suppl. 1): 131-160. Epub 2015 April 01.

Key words: tropical fjord, Tropical East Pacific, water currents, wind system, nutrients, zooplankton.

El Golfo Dulce fue investigado desde la perspectiva de la oceanografía química, física y geológica, inicialmente por Richards, Anderson, y Cline (1971), en dos visitas efectuadas en marzo de 1969 a bordo del B/I *Thomas G. Thompson*. Se describió así su naturaleza

de cuenca anóxica intermitente, que presenta pequeñas concentraciones de sulfuro de hidrógeno en las aguas a profundidades mayores de los 100m, y en la que en ciertas ocasiones, penetran por el fondo aguas densas con un bajo contenido de silicato y fosfato, alto oxígeno



disuelto y moderadamente alto nitrato. A finales de 1993 e inicios de 1994 el Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR) de la Universidad de Costa Rica, en conjunto con investigadores de Centro Leibniz de Ecología Marina Tropical de Alemania (ZMT), la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA), el Instituto de Ciencias Geológicas de la Universidad de Bremen (IGS) y el Instituto Max Plank de Microbiología Marina (MPI), realizaron otro estudio oceanográfico del Golfo Dulce a bordo del B/I *Victor Hensen*, el cual dio origen a un Suplemento Especial de la Revista de Biología Tropical (RBT 44 Suppl. 3, 1996). En el periodo de 2001-2003 la Universidad de Costa Rica, representada por el CIMAR, y la Fundación Costa Rica-Estados Unidos para la Cooperación (CR-USA), financiaron un proyecto denominado 'Contaminación Costera en Costa Rica (CoCosRi)', el cual incluyó estudios del Golfo Dulce en temas como la presencia de coliformes fecales, hidrocarburos de petróleo, plaguicidas persistentes y bifenilos policlorados, y la evaluación de los parámetros fisicoquímicos, entre otros. En 2001, el CIMAR en conjunto con investigadores del Departamento de Ecología Marina del Instituto de Investigación Ambiental Nacional de Dinamarca y del Instituto de Biología del Centro Danés para las Ciencias del Sistema Terrestre, de la Universidad del Sur de Dinamarca, llevaron a cabo un importante descubrimiento en el Golfo Dulce, en cuanto a la ocurrencia del proceso de oxidación anaeróbica del ion amonio (anammox, por su acrónimo en inglés), en el ciclo del nitrógeno en el ambiente marino de fosas anóxicas (Dalsgaard, Canfield, Petersen, Thamdrup & Acuña-González, 2003). Este importante hallazgo oceanográfico, complementa una serie de trabajos sobre la oceanografía del Golfo Dulce publicados tanto por investigadores nacionales como internacionales (Brenes & León, 1988; Quirós, 1989; Córdoba & Vargas, 1996; Wolff, Hartmann & Koch, 1996; Quirós, 2003; Svendsen et al., 2000; 2006). Se estima que el Golfo es una región que podría albergar cerca del 23% de la diversidad marina costera del Pacífico costarricense

(Morales-Ramírez, 2011). Quesada-Alpizar y Morales-Ramírez (2004) confirmaron la existencia una fuerte estratificación vertical de la columna de agua asociada a la morfología de la cuenca del Golfo y a la incidencia del fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y determinaron diferencias significativas en las características hidrográficas de las partes interna y externa, con eventos bianuales de entrada de agua oceánica fría, de alta salinidad y oxígeno disuelto. Efectos de lo anterior se reflejaron en la composición del zooplancton gelatinoso (Morales-Ramírez & Nowaczyk, 2006) y no gelatinoso (Quesada-Alpizar & Morales-Ramírez, 2006). Por su parte, Svendsen et al. (2006), midieron gradientes sobre la superficie del agua en algunas variables físicas, como salinidad y temperatura. Los resultados fueron relacionados con la descarga de los ríos, con el viento local y sus efectos topográficos. Aunque en su globalidad el Golfo Dulce no presenta grados altos de contaminación asociada con plaguicidas organoclorados, con bifenilos policlorados, ni con hidrocarburos de petróleo y residuos de antibióticos (Sponberg & Davis, 1998; Acuña-González, Vargas-Zamora, Gómez-Ramírez & García-Céspedes, 2004; García-Céspedes, Acuña-González & Vargas-Zamora, 2004; Sponberg, 2004; García, Acuña-González, Vargas-Zamora & García-Céspedes, 2006; Sponberg, Witter, Acuña, Murillo, Umaña, Gómez, & Pérez, 2011), deben dedicarse esfuerzos para la recuperación de la Bahía de Golfito. La historia socio-económica de las regiones aledañas al Golfo Dulce, entre ellas la Península de Osa, revela que esta zona ha experimentado en los últimos años un crecimiento demográfico acelerado, acompañado por una alta deforestación concatenada al incremento de las zonas agrícolas, así como a un aumento en la actividad turística (Lewis, 1982; Umaña, 1998; Quesada-Alpizar & Cortés, 2006; Morales-Ramírez, 2013). Todo el conocimiento documentado en los últimos 30 años, nos permite asegurar que el Golfo Dulce es un sistema único y que debe ser protegido y preservado en su estado natural, no solo por las amenazas apuntadas, sino también por su

relevancia en la dinámica social de las comunidades aledañas (Morales-Ramírez, 2013). Con la finalidad de actualizar la información oceanográfica, de septiembre del 2005 a noviembre del 2007, el CIMAR participó en un programa integral de la Universidad de Costa Rica, denominado ‘Programa Institucional de la Península de Osa’ (PIOSA). Este programa estudió las características oceanográficas más relevantes del Golfo Dulce, con el propósito de actualizar una perspectiva dinámica acerca de la calidad de sus aguas. De este modo se busca que mediante enfoques ecosistémicos y de gestión integrada (Morales-Ramírez, 2013) se lleven a cabo acciones pertinentes para asegurar su conservación, con los diversos componentes y representantes de las comunidades aledañas, y de aquellas que tienen influencia directa o indirecta en las cuencas de los ríos que desaguan en el Golfo. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es realizar una revisión sobre la dinámica oceanográfica del Golfo Dulce, aportar nueva información y ofrecer recomendaciones

a diferentes usuarios (pescadores, comunidades costeras, turistas, científicos) y gestores (INCOPECSA, SINAC, ACOSA) para su conservación y aprovechamiento sostenible de sus recursos

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de Estudio: El Golfo Dulce es una bahía semicerrada, tectónicamente formada, del Pacífico Tropical Oriental, localizado en la costa sur de Costa Rica, entre los 8°27' N y 8°45' N y los 83°07' W y 83°30' W longitud oeste. El golfo tiene cerca de 50km de longitud y de 10 a 15km de ancho, con un área superficial cercana a los 680km² y se caracteriza por poseer una cuenca interna de pendiente fuerte con una profundidad máxima de 215m y una cuenca externa poco profunda de unos 70m (Richards et al., 1971; Hartmann & Acevedo-Gutiérrez, 1996; Hebbeln, Beese & Cortés, 1996) (Fig. 1). Estas características tienden a restringir la circulación del agua en la cuenca

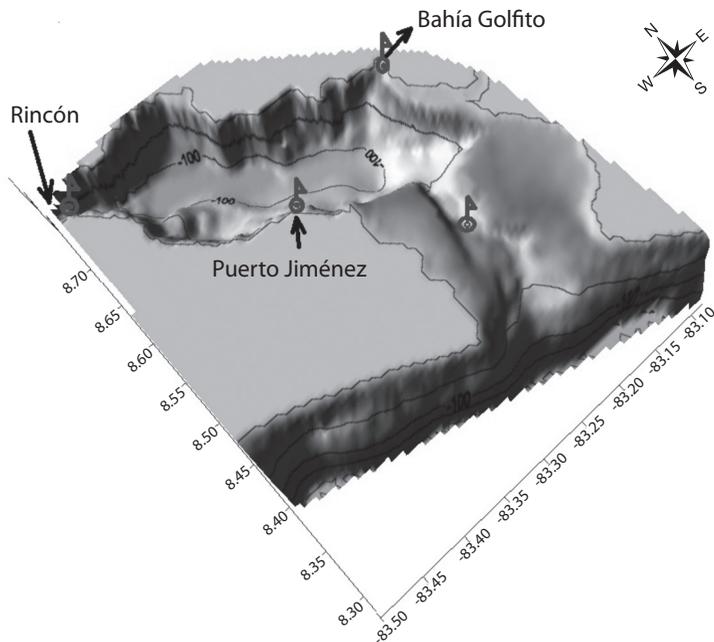


Fig. 1. Batimetría en 3 dimensiones del Golfo Dulce y las posiciones de los correntímetros, durante el periodo de estudio de acuerdo con el Cuadro 1.

Fig. 1. 3D bathymetry in Golfo Dulce and the positions of current meters, during the study period according to Table 1.

interna del golfo y a favorecer la transformación de sus aguas profundas en un medio anóxico. Tal circulación asemeja a la de los fiordos de altas latitudes de América y de Europa, y este golfo es uno de tan solo cuatro sistemas de este tipo conocidos en los trópicos (Richards et al., 1971; Fairbridge, 1980). Información adicional sobre sus rasgos oceanográficos, meteorológicos y climáticos pueden encontrarse en Herrera (1985), Quesada-Alpizar y Morales-Ramírez (2004) y Svendsen et al. (2006).

Oceanografía y Meteorología: Se anclaron dos correntímetros (Sensor Data, SD 6000) entre marzo del 2005 y julio del 2007 (Cuadro 1) en cada uno de cuatro sitios distribuidos en el Golfo Dulce (Fig. 1). Uno estuvo aproximadamente a 2m de la superficie en marea baja, y el otro a unos 10m del fondo. Las predicciones de las mareas para los días de los muestreos se obtuvieron del *software* Tides & Tables (Lizano, 2006), de manera que se pudieran superponer las mareas altas y bajas sobre los datos de las corrientes. Las características generales del viento y del oleaje en agua profunda (30mn afuera de la costa) se obtuvieron de Lizano (2007). La propagación y la generación del oleaje, desde y hacia el interior del Golfo Dulce, se basó en Lizano (2003). Se utilizaron los valores de precipitación acumulada con registro diario de la estación meteorológica automática de Golfito, actualmente localizada en 8°3' N - 83°10' W, 6msnm, complementada

con los datos de la estación meteorológica tradicional con el mismo nombre. El registro de datos meteorológicos cubrió de mayo de 1941 a febrero de 2010. De esta misma estación también se contó con datos con resolución horaria del viento, magnitud y dirección para los días de las seis giras de campo que se realizaron en noviembre de 2005, febrero de 2006, julio de 2006, febrero y julio de 2007. Los valores de temperatura superficial del aire (TSA), correspondieron al conjunto de datos elaborado por Magaña, Amador y Medina (1999), para el promedio de los sitios localizados en la rejilla 8.5° N - 83.5° W y 8.5° N - 83.0° W, con una resolución espacial de 0.5° de latitud por 0.5° de longitud, para 1950-1998. Se usó el registro mensual de la temperatura superficial del mar (TSM) correspondiente al sitio centrado en 8°N, 82°W, de una rejilla de 2° de latitud por 2° de longitud del conjunto de datos elaborado por Smith, Reynolds, Peterson, y Lawrimore (2008), para el periodo de enero de 1854 a mayo de 2011.

Oceanografía química y zooplancton:

La selección de los sitios de muestreo se hizo con base en los muestreos de Richards et al. (1971) y de la campaña del B/I *Victor Hensen*, 1993-1994 (Thamdrup, Canfield, Ferdelman, Glud & Gundersen, 1996; Wolff & Vargas, 1994). Los datos empleados en este artículo provienen de cinco visitas efectuadas a dos sitios en el extremo noroeste del golfo, tanto en

CUADRO 1

Ubicación de los anclajes en el Golfo Dulce, Costa Rica, durante el periodo septiembre de 2005-noviembre de 2007. Sus posiciones se muestran en la Fig. 1

TABLE 1

Location of moorings in the Golfo Dulce, Costa Rica, during the period September 2005-November 2007. Their positions are shown in Fig. 1

Lugar	Fecha	Latitud N	Longitud W	Profundidad (m)
Rincón	03-11-2005	08°42'45.9"	83°28'01.4"	101.0
Boca B. Golfito	28-02-2006	08°36'32.3"	83°12'05.6"	94.1
Boca Golfo Dulce	25-07-2006	08°27'27.5"	83°12'49.5"	65.3
Puerto Jiménez	11-10-2006	08°33'18.7"	83°18'05.9"	85.0
Boca B. Golfito	14-02-2007	08°36'35.0"	83°12'01.8"	94.0
Boca Golfo Dulce	18-07-2007	08°27'16.9"	83°12'42.3"	64.5

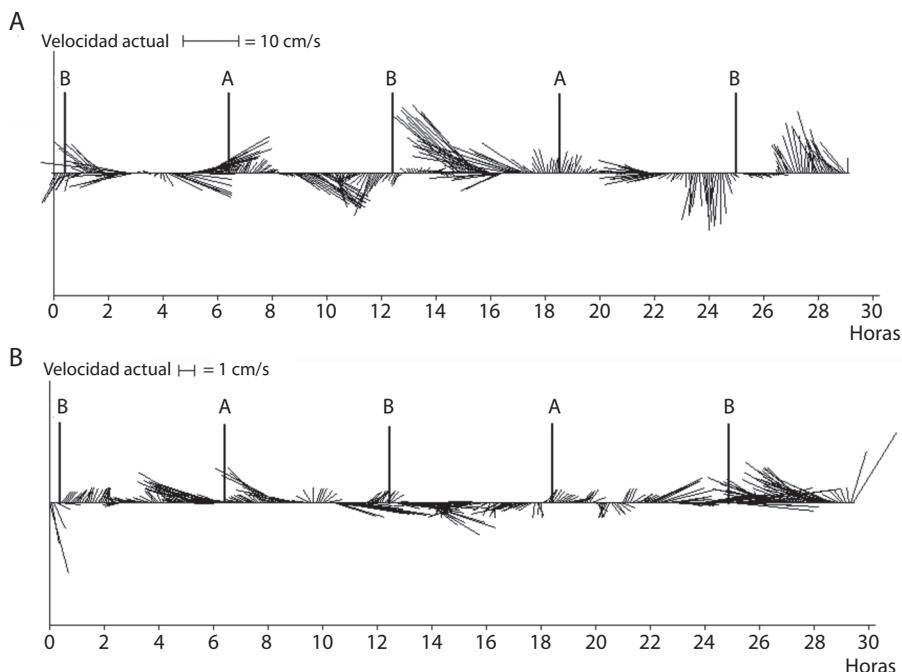


Fig. 2. Vectores de corrientes en A: superficie y B: fondo en Rincón, Golfo Dulce el 03-04 de noviembre del 2005. Las líneas verticales indican marea baja (B) o marea alta (A).

Fig. 2. Current vectors in A: surface and B: bottom, in Rincón, Golfo Dulce on 03-04 November 2005. Vertical lines indicate low tide (B) or high tide (A).

la estación lluviosa como la seca, en el periodo de noviembre de 2005 a septiembre de 2007 (Cuadro 1). Esta es una zona de aguas muy tranquilas, de oleaje bajo a moderado; los sitios de muestreo fueron identificados como GD1, dentro de la influencia de la estela del Río Rincón, y GD2, en las cercanías de la estela del Río Esquinas. Se recolectaron muestras de agua para el componente de oceanografía química, en puntos separados cada 10m de profundidad en la columna de agua, desde la superficie hasta los 140m en los sitios más profundos, para un total de entre 11 y 15 puntos y no se llegó al fondo (>200m). En el litoral noreste del golfo se realizaron siete expediciones a dos sitios, que incluyeron la estación lluviosa y la seca, entre febrero de 2006 y noviembre de 2007 (Cuadro 2): GD3, cerca de Punta Gallardo, caracterizado por rápidas corrientes de marea, de oleaje moderado a alto, y de frecuente transporte marítimo, y GD4, de oleaje moderado y

muy cerca de la desembocadura del Río Coto-Colorado, cuya cuenca es la más extensa de todos los tributarios del Golfo Dulce (Umaña, 1998). Se obtuvieron muestras de agua cada 10m de profundidad en la columna de agua, desde la superficie hasta los 140m, para un total de 11 puntos en GD3; tampoco se llegó al fondo (>200m), y en GD4, desde la superficie hasta los 60-70m para un total de siete puntos. En el sector suroeste se ubicó GD5, en el borde interno de la Península de Osa frente a Puerto Jiménez, lugar de oleaje moderado; es una región importante para el turismo y el cabotaje y se visitó solo una vez en la época lluviosa, en octubre de 2006. Se efectuaron mediciones in situ y se recolectaron muestras de agua cada 10m de profundidad, desde la superficie hasta los 80m, para un total de 9 puntos (Cuadro 2). A cada uno de estos sectores se llegó por medio de dos embarcaciones tipo Zodiac®, una equipada con un cabrestante de operación manual.

CUADRO 2

Caracterización fisicoquímica de la capa superficial (0 a 1m) del agua del sector noroeste del Golfo Dulce (Rincón), Costa Rica, en las estaciones lluviosas de 2005-2007, y secas de 2006-2007. Coordenadas: GD1 (08°42.492' N - 083°27.088' W), GD2 (08°40.911' N - 083°23.272' W)

TABLE 2

Physical-chemical characterization of the surface layer (0 to 1m) of water northwest side of the Golfo Dulce (Rincón), Costa Rica, in the rainy seasons of 2005-2007 and 2006-2007 dry. Coordinates: GD1 (08°42.492' N - 083°27.088' W), GD2 (08°40.911' N - 083°23.272' W)

Sitio	Estación lluviosa				
	GD1		GD2		
Mes, año	Nov. 2005	Sep. 2006	Sep. 2007	Sep. 2006	Sep. 2007
PSecchi (m)	>10	>11.5	2.5	6.9	7.0
S (ups)	20	26	29	26	25
T (°C)	27.5	31.4	29.9	31.2	30.0
O.D. (mg/L)	7.30	6.00	5.25	5.60	5.44
Sat. (%)	114.2	104.8	90.5	97.4	92.0
M.S. (mg/L)	7.39	15.14	12.21	12.49	7.64
Chl- <i>a</i> (mg/m ³)	0.35	0.27	0.12	1.42	0.35
Fosfato	0.11	0.33	0.47	0.09	0.35
Silicato	82.1	14.5	31.4	22.1	52.1
Nitrito	0.08	0.03	0.13	nd	nd
Nitrato	nd	2.03	<0.11	0.47	0.22

Sitio	Estación seca			
	GD1		GD2	
Mes, año	Mar. 2006	Mar. 2007	Mar. 2006	Mar. 2007
PSecchi (m)	10.4	9.5	9.5	6.5
S (ups)	32	30	30	30
T (°C)	31.0	30.5	31.0	29.5
O.D. (mg/L)	5.60	4.50	4.90	5.00
Sat. (%)	100.3	78.9	86.8	86.0
M.S. (mg/L)	11.13	11.37	10.57	13.07
Chl- <i>a</i> (mg/m ³)	0.35	0.34	0.02	0.36
Fosfato	0.02	0.18	0.08	0.10
Silicato	7.23	4.36	6.44	8.63
Nitrito	nd	0.45	nd	0.09
Nitrato	nd	nd	nd	<0.12

Simbología: PSecchi=Profundidad de observación del disco Secchi, S=Salinidad, T=Temperatura, O.D.=Concentración de oxígeno disuelto, Sat.=Saturación de oxígeno disuelto, M.S.=Materiales en suspensión, Chl-*a*=Clorofila-*a*. La concentración de nutrientes en mmol/L; nd=no detectado; entre el límite de detección y de cuantificación del método.

Legend: =depth observation PSecchi Secchi disk, S=Salinity, T=temperature, DO=dissolved oxygen concentration, Sat=saturation dissolved oxygen, suspended MS=Materials, Chl-*a*=chlorophyll-*a*. The concentration of nutrients in mmol/L, nd=not detected; between the limit of detection and quantification of the method.

Dada la hidrografía del Golfo Dulce, de presentar una primera capa de agua de unos 60m, en la que ocurre con alguna intensidad la mezcla de sus constituyentes fisicoquímicos, y sin perder de vista que las distribuciones

verticales a intervalos de 10m ofrecen un perfil más fino de los gradientes conforme se descende en la columna de agua, los datos se presentarán como promedios ± D.E. en función de la estación climática (lluviosa, seca) y

agrupados en dos estratos: la capa superficial hasta los 60m y la capa del fondo, que iniciaría después de los 60m hasta llegar a la base del sitio específico.

Los parámetros evaluados en la columna de agua fueron la profundidad de observación del disco de Secchi (P_{Secchi}, m), la salinidad (ups, unidades prácticas de salinidad), la temperatura (°C), la concentración de oxígeno disuelto (O.D., mg/L), la concentración de los materiales en suspensión (M.S., mg/L), la concentración de clorofila-*a* (Chl-*a*, mg/m³), y la concentración de nutrientes disueltos: fosfato (ortofosfato inorgánico disuelto), silicato, nitrito y nitrato (μmol/L). En cada sitio de muestreo se midió la profundidad de observación del disco de Secchi, y a continuación con una botella de Niskin de 5L de capacidad, se extrajo agua a cada profundidad; se midieron la temperatura y la O.D. con un medidor YSI modelo 550A, y la salinidad con un Refractómetro manual ATAGO S/Milli-E[®], calibrado con agua de mar estándar. Las muestras de agua se trasvasaron rápidamente de la botella Niskin a frascos plásticos oscuros, se protegieron de la entrada de luz, se colocaron en hieleras y se filtraron en el campo, a través de filtros de microfibras de vidrio (GF/C o equivalentes), de 0.45micras y 47mm de diámetro. Muestras del agua filtrada y debidamente identificadas se colocaron en botellas plásticas ámbar de 500mL, y se almacenaron en hieleras durante su transporte al laboratorio de Oceanografía Química del CIMAR (LOQ-CIMAR), donde se congelaron a -20°C hasta el momento de determinarles la concentración de los nutrientes, de acuerdo con la metodología de Strickland y Parsons (1972), modificada y validada en el LOQ-CIMAR. El material retenido en los filtros se empleó para la determinación de M.S. por medio de la técnica gravimétrica (secado durante 24 horas a 60°C), y la Chl-*a* por el método espectrofotométrico (Strickland & Parsons, 1972).

Recolecta y procesamiento de las muestras de zooplancton: Una vez determinada la posición de la termoclina en la columna de

agua de cada estación, se procedió a efectuar arrastres verticales para recolectar zooplancton con una red cónica de 50cm de diámetro de apertura y 200μm de poro de red. Con la ayuda de un mecanismo de cierre remoto para la red, se realizó un arrastre por encima, uno por debajo y otro a través de la termoclina. Los volúmenes de agua filtrados fueron calculados matemáticamente, conocidos el área de la boca de la red y la distancia de arrastre en cada estrato. En cada estación también se tomó una muestra horizontal de zooplancton con la misma red, a una velocidad promedio de un nudo y por espacio de 5 minutos. La concentración del zooplancton en estos arrastres también se calculó matemáticamente. Las muestras de zooplancton fueron fijadas en formalina al 4% (Omori & Fleminger, 1976) y llevadas a los laboratorios del CIMAR para ser procesadas. Para la determinación de la biomasa peso seco (mgPS*m⁻³), se tomó hasta ¼ de la muestra original, se filtró, usando filtros pre-pesados GF/C Whatman, un equipo Millipore[®] y una bomba de vacío; se lavaron los filtros con agua destilada para remover las sales y evitar sobreestimaciones en los valores (Omori, 1978). Luego se colocaron en una estufa a 60°C de temperatura por espacio de 8-10 horas. Los filtros se dejaron alcanzar la temperatura ambiente y se pesaron en una balanza analítica. Para el análisis de la composición y abundancia del zooplancton, se tomaron alícuotas de 5mL, hasta completar un conteo mínimo de 400 organismos por muestra. El análisis cuantitativo se llevó a cabo en una cámara Bogorov modificada y la concentración de organismos se expresa como n*m⁻³.

RESULTADOS

Corrientes marinas: El Cuadro 1 resume las fechas y las profundidades de los anclajes en el Golfo. Las corrientes superficiales en Rincón fueron relativamente las más bajas del Golfo Dulce, con un valor promedio de 5.1cm/s, mientras que en el fondo la velocidad promedio fue de tan solo de 2.0cm/s. Como muestra la Fig. 2, no existió un patrón definido en las corrientes, ni se observa correlación con

la marea. No se notó algún esquema similar entre el flujo superficial y el fondo. Hubo una predominancia de un flujo este-oeste, hacia el interior y exterior de esa bahía interna. La Fig. 2 muestra los vectores de las corrientes marinas, cuya magnitud se puede identificar desde la escala que se adjunta en dicha figura. En ella se ha señalado el momento en que se alcanzan la marea alta y la marea baja, medidas en relación con la estación de marea en Bahía Gofito. Las mediciones que se hicieron en el canal entre Bahía Gofito y el Golfo Dulce mostraron valores de corrientes más altas (promedios de 13.6cm/s en la superficie y 3.6cm/s en el fondo). No se encontró relación entre el flujo de la superficie y del fondo; tampoco relación con la marea (Fig. 3). En Puerto Jiménez (Fig. 4), las corrientes fueron también relativamente débiles, promedio en la superficie de 5.4cm/s y 4.8cm/s en el fondo. En este caso se notó una persistencia del flujo en la superficie hacia el sur-sureste (saliendo del golfo), paralelo a la costa, mientras que por el fondo, el flujo

fue predominante hacia el noroeste (interior del golfo). Las corrientes más intensas se registraron en la boca de Golfo Dulce, tanto en la superficie como en el fondo (promedios de 17.8cm/s en la superficie y 15.3cm/s en el fondo) (Fig. 5). En esta estación la dirección predominante fue norte-sur, consecuente con la orientación de la boca del golfo y con la entrada y salida de las mareas. En este caso sí se encontró un patrón de corrientes que cambia con la marea.

Oleaje y viento: Según los datos de Lizano (2007, 2013), el oleaje en agua profunda que puede alcanzar el Pacífico Sur de Costa Rica, es del suroeste, seguido por el del sur, y luego del oeste. Esta frecuencia en porcentaje, se muestra en la Fig. 6. Generalmente el oleaje del suroeste y sur fue en su mayoría de origen remoto (Lizano, 2007), llamado marejada de fondo o mar de leva (Fig. 7A). Como muestra esta figura, el oleaje al alcanzar la boca del golfo, se dispersó en la entrada hacia un lado

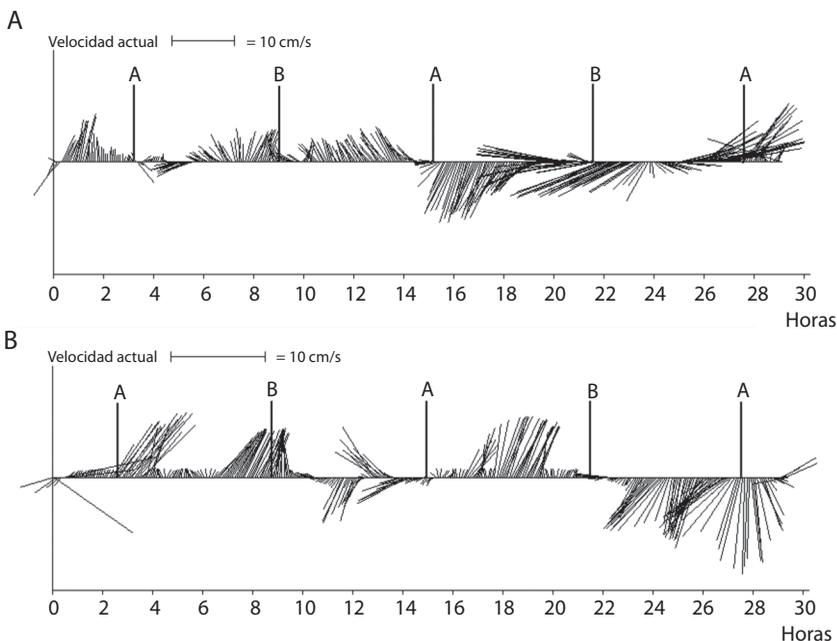


Fig. 3. Vectores de corrientes en superficie en la boca de Bahía Gofito en A: superficie y B: fondo el 14 de febrero del 2007. Las líneas verticales indican marea baja (B) o marea alta (A).

Fig. 3. Surface current vectors in the mouth of Bahía Gofito A: surface and B: bottom, February 14, 2007. Vertical lines indicate low tide (B) or high water (A).

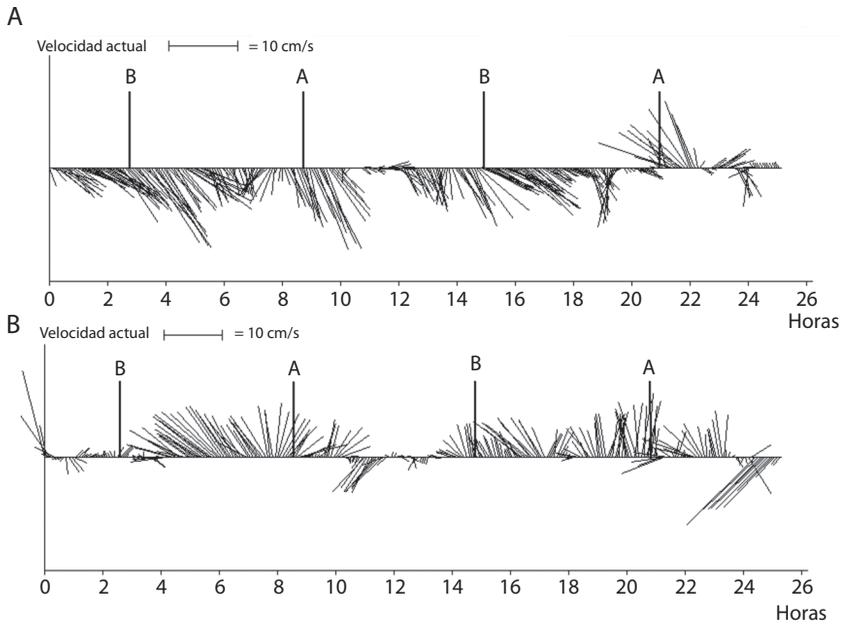


Fig. 4. Vectores de corrientes en superficie en Puerto Jiménez en A: superficie y B: fondo el 11 de octubre del 2007. Las líneas verticales indican marea baja (B) o marea alta (A).
Fig. 4. Surface current vectors in Puerto Jimenez A: surface and B: bottom on October 11, 2007. Vertical lines indicate low tide (B) or high tide (A).

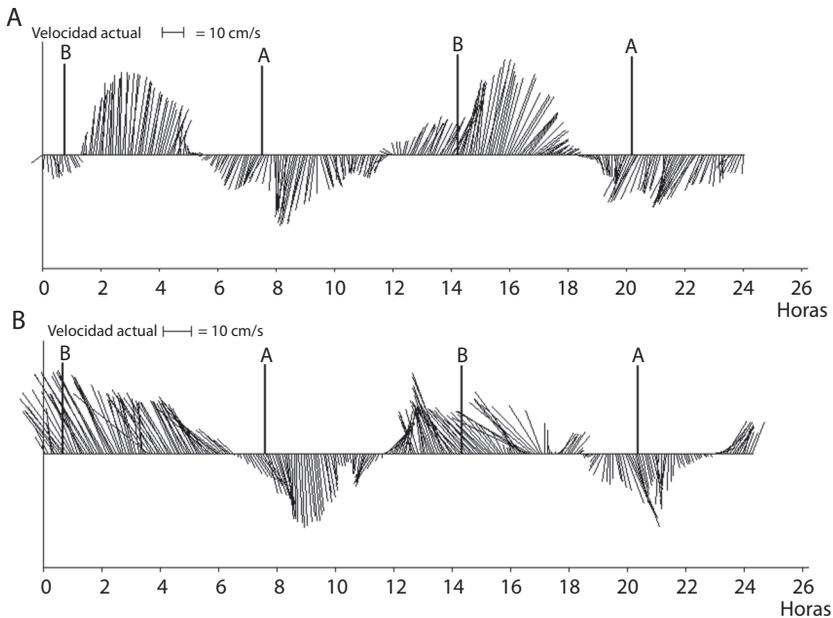


Fig. 5. Vectores de corrientes en A: superficie y B: fondo en la boca Golfo Dulce en A: superficie y B: fondo el 25-26 de julio del 2006. Las líneas verticales indican marea baja (B) o marea alta (A).
Fig. 5. Current vectors in A: surface and B: Bottom in the mouth of on the Golfo Dulce A: surface and B: Bottom on 25-26 July 2006. Vertical lines indicate low tide (B) or high water (A).

Frecuencia de dirección de ola en el Pacífico Sur - Datos NOAA-NCEP

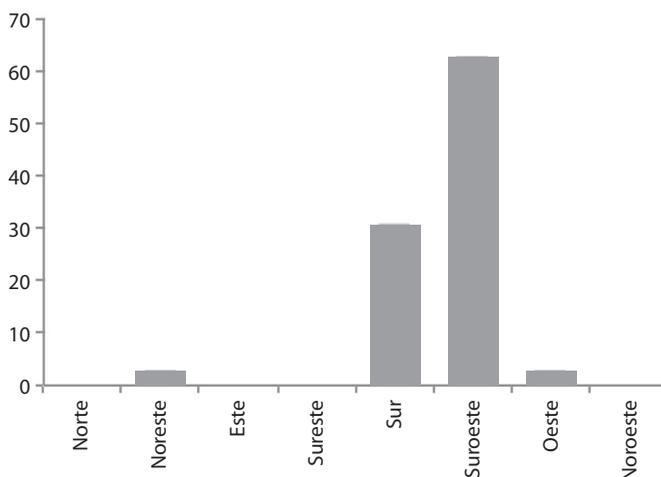


Fig. 6. Frecuencia de dirección del oleaje en agua profunda al frente de Golfo Dulce, Costa Rica.
Fig. 6. Frequency of the dirección of the wave in deep water front the Golfo Dulce, Costa Rica.

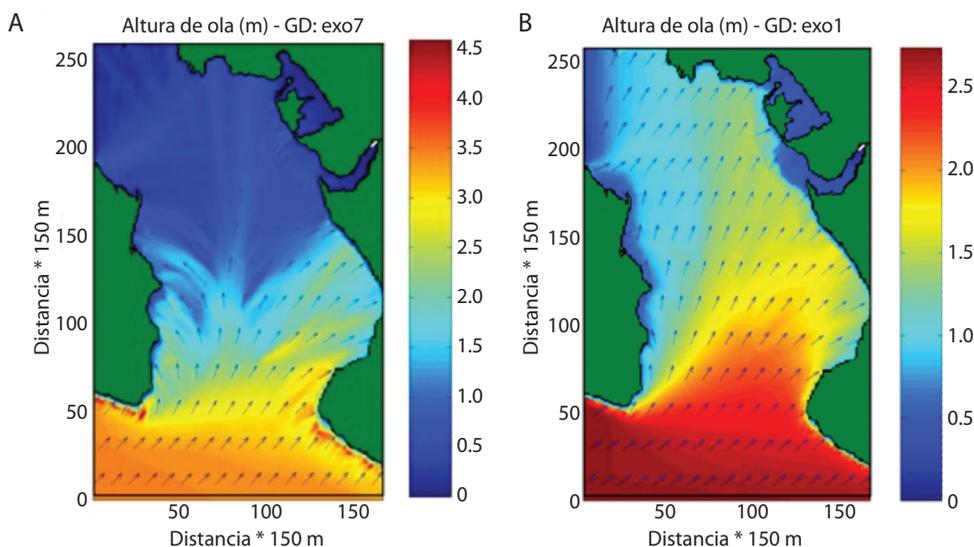


Fig. 7. (A) Marejada de fondo: $H_{1/3}=3.43\text{m}$, $T_p=15.45\text{s}$, $Az=225^\circ$ (respecto al norte), y (B) mar de viento: $H_{1/3}=2.7\text{m}$, $T_p=6.76\text{s}$, $Az=234.34^\circ$ en el Golfo Dulce, Costa Rica. (Tomados de Lizano, 2003).
Fig. 7. (A) Swell: $H_{1/3}=3.43\text{m}$, $T_p=15.45\text{s}$, $Az=225^\circ$ (respect to north), and (B) Sea: $H_{1/3}=2.7\text{m}$, $T_p=6.76\text{s}$, $Az=234.34^\circ$ in Golfo Dulce, Costa Rica. (From Lizano, 2003).

y otro, perdiendo la mayor parte de su energía, por lo que no ingresó hacia el interior del golfo. Pero también puede darse viento local que genera mar de viento (mar picado) afuera

y dentro del golfo desde cualquiera de estas direcciones, aunque con menor frecuencia que el oleaje remoto (Lizano, 2013). Este oleaje sí tuvo más penetración hacia al interior del

golfó, como muestra la Fig. 7B. En este caso se tendrían olas con alturas sobre 1,5m frente a la entrada de Bahía Golfito. Respecto del viento, los oestes ecuatoriales están presentes en estas costas (Lizano, 2007) a partir de junio, que como muestra la Fig. 8A, fueron más intensos entre septiembre y octubre. Fue justamente en este tiempo cuando se presentaron las mayores alturas de ola promedio (Fig. 8B) en esta zona (Lizano, 2007). De diciembre a abril, los vientos alisios, hacia afuera de la costa (Fig. 8A), disminuyeron la energía de oleaje entrante en esta región (Fig. 8B).

Meteorología: El ciclo anual de la precipitación en la estación de Golfito se muestra en la Fig. 9. Se notó un patrón bimodal, típico de la vertiente Pacífica de América Central (Taylor & Alfaro, 2005), con máximos en los meses de mayo y octubre; este segundo el mayor de los dos, con más variabilidad asociada y el correspondiente con más número de días observados con lluvia. Se notó una disminución de la precipitación entre mayo y octubre, en donde típicamente se encuentra el periodo conocido como veranillo o canícula (Amador, 2008). El mes de mínima precipitación fue el de febrero, que también fue el de menor variabilidad y el que presentó menos días con precipitación. El valor del acumulado anual promedio en dicha estación fue de 4669mm.

La Fig. 10 presenta el ciclo anual de la TSA y la TSM. Los valores promedios anuales

fueron de 26°C y 27°C, respectivamente. El valor máximo (mínimo) de la TSA se observó en marzo (noviembre), mientras que el de la TSM en mayo (enero). Entre el año 1854 y el 2011, la TSM presentó una tendencia lineal positiva (Fig. 11). En la Fig. 12 se muestran los valores horarios de las corrientes y los vientos observados durante el trabajo de campo. Los valores del viento mostraron muy poca relación con los de las corrientes, debido a que principalmente se observó la existencia de sistemas mesoescales relacionados con la presencia de brisa marina y terrestre (Holton, 2004), es decir, hubo una predominancia de vientos desde el mar conforme avanza el calentamiento diurno y hacia el mar en horas de la noche; este comportamiento fue observado en otros sitios costeros del Pacífico costarricense por Muñoz, Fernández, Gutiérrez y Zárate (2002a).

Oceanografía química y zooplancton

Generales: Durante la estación lluviosa la zona fótica, establecida en función de la PSecchi, estuvo en el ámbito de 2.5m a más de 11.5m en las regiones de GD1 y GD2. En GD3 alcanzó profundidades menos agudas en el ámbito de 2.5m a 7.3m, y en GD4 se destacó la influencia de los sedimentos acarreados por la escorrentía del Río Coto-Colorado, pues el ámbito estuvo entre 0.50m y 4.0m. En GD5 la PSecchi fue 4.3m. Durante la estación seca, las PSecchi fueron mayores en los cuatro sitios

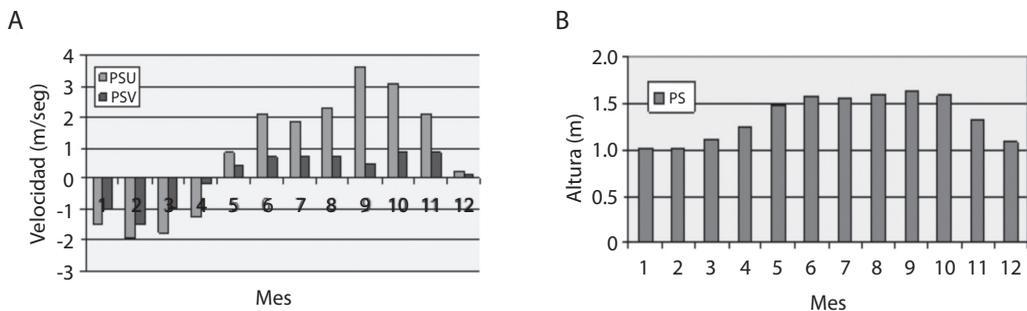


Fig. 8. (A) Zonal (PSU) and meridional components of wind (PSV) head up to Golfo Dulce. The average of the wave height is presented in (B) (PS).

Fig. 8. (A) Zonal (PSU) and meridional components of wind (PSV) head up to Golfo Dulce. The average of the wave height is presented in (B) (PS).

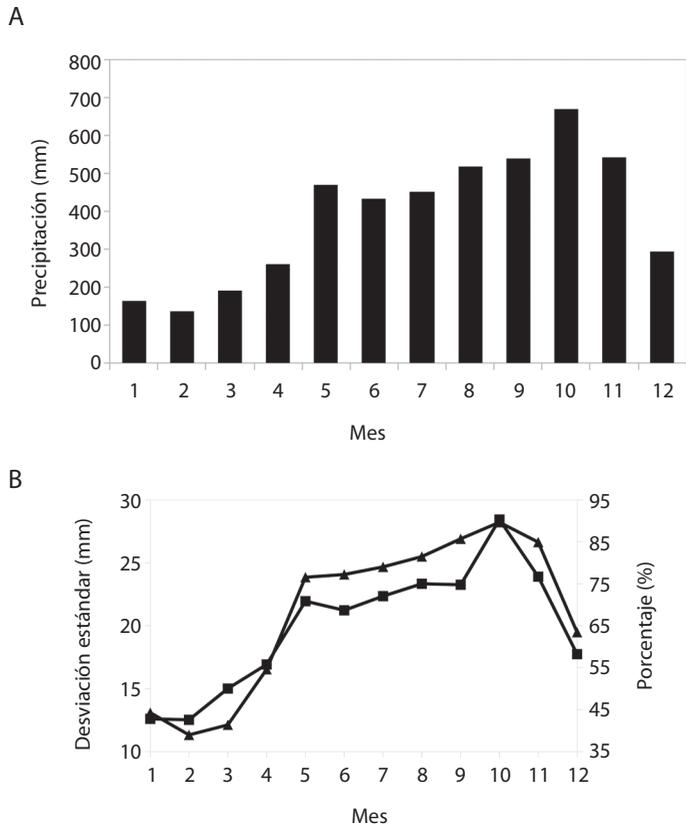


Fig. 9. (A) Precipitación mensual acumulada promedio. **(B)** Porcentaje del número mensual de días en los cuales se registró precipitación (línea con cuadrados) y desviación estándar de la precipitación (línea con triángulos). Valores observados en la estación de Golfito, Costa Rica (8°3' N - 83°10' W, 6msnm, mayo de 1941 a febrero de 2010).

Fig. 9. (A) Average of monthly accumulated precipitation. **(B)** Monthly percentage of the days with precipitation (line with squares) and precipitation standard deviation (line with triangles). Values observed in the station of Golfito, Costa Rica (8°3' N - 83°10' W, 6masl, May 1941-February 2010).

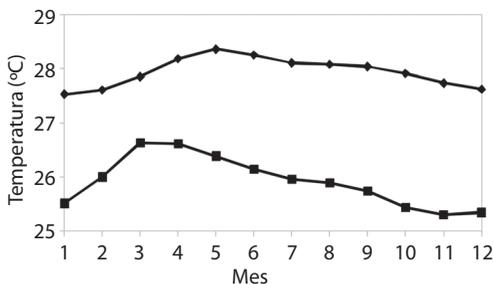


Fig. 10. Promedio mensual de la temperatura superficial del mar (TSM, línea con rombos) y del aire (TSA, línea con cuadrados).

Fig. 10. Diamond (squared) line is for the monthly average sea (air) surface temperature, AST and SST, respectively.

(GD1 a GD4), y de manera destacable en GD4, donde el ámbito (7.25m a más de 12.0m), reveló el menor influjo de sedimentos en las aguas de la escorrentía terrestre. Las isopletas de las distribuciones temporales en febrero de 2006 a noviembre de 2007, de tres parámetros muy importantes para el desarrollo y mantenimiento de la vida marina: la salinidad, la temperatura y la concentración de oxígeno disuelto (O.D.), evidenciaron la presencia de una haloclina, una termoclina y una oxiclina en la columna de agua de los sitios muestreados en el Golfo Dulce (Fig. 1). Sus posiciones variaron dentro

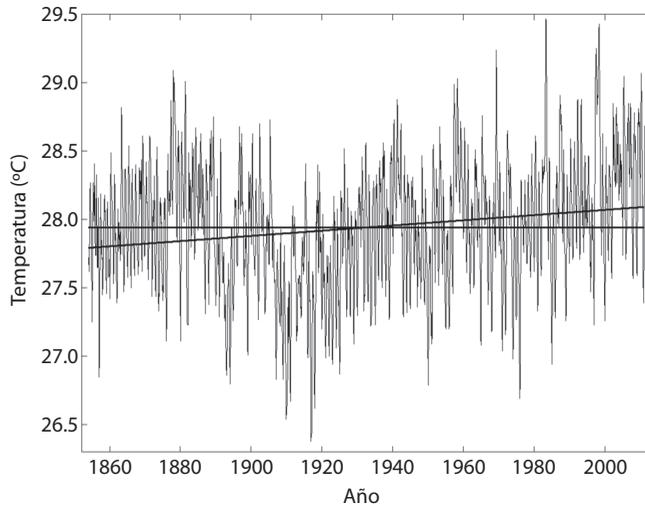
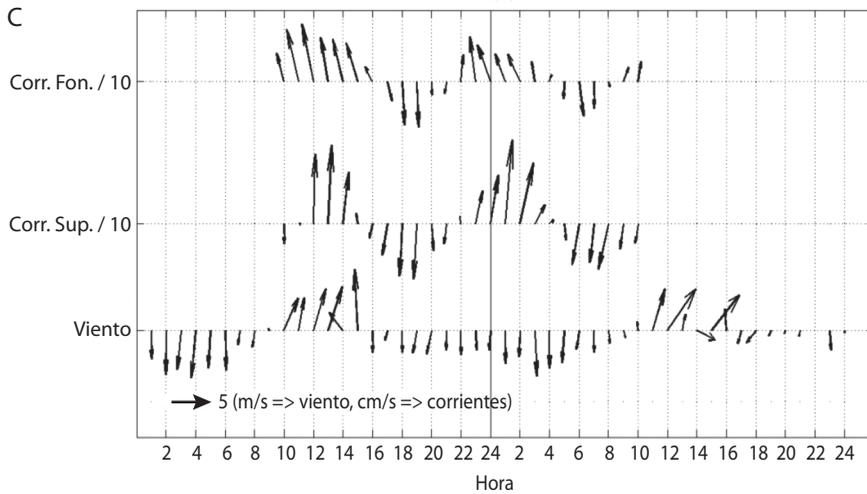
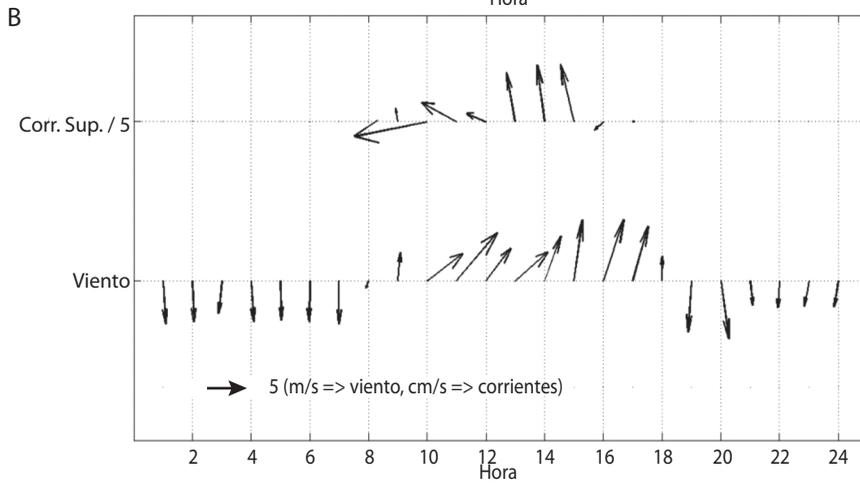
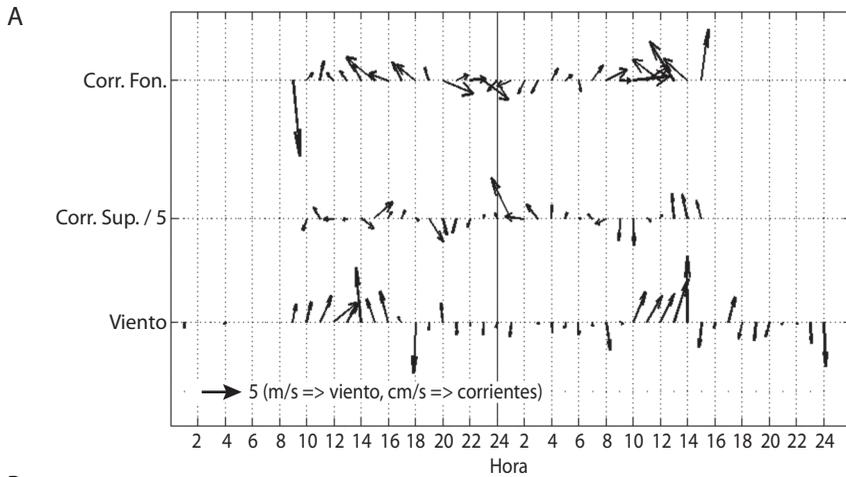


Fig. 11. La línea gris corresponde a la serie mensual de la temperatura superficial del mar para el punto centrado en 8° N - 82° W. La línea horizontal corresponde al promedio de la serie de 28°C. La tendencia lineal fue de 0.0019°C/año, significativa a más del 99% (línea negra continua).

Fig. 11. Gray line is for the monthly sea surface temperatures for the grid point centered in 8° N - 82° W. The horizontal line correspond the series average of 28°C. Linear trend (solid black line) is 0.0019°C/year, with a statistical significance greater the 99%.

de un pequeño margen, en el ámbito de 20m a 60m, tanto en la estación lluviosa como en la seca. En las Fig. 13, 14 y 15 se muestran ejemplos de la distribución vertical en función del tiempo, de la salinidad, la temperatura y el O.D., respectivamente, medidos en la columna de agua de GD3, cerca de la entrada a la Bahía de Golfito. En la Fig. 13 se observa que la masa de agua del fondo de la fosa estuvo caracterizada por una alta salinidad en el ámbito de 33ups a 35ups, y una temperatura baja, en el ámbito de 16.5°C a 18.3°C, con respecto al ámbito de la temperatura de la capa superficial de 27.1°C a 32.5°C (Fig. 14). Se nota también que las variaciones verticales y temporales de las O.D. (Fig. 15), evidenciaron que en las aguas profundas disminuyó drásticamente la concentración de este gas, por ejemplo el recorrido de la isopleta a 0.50mg/L, comparado con los valores en la superficie, en los que se advierte que en varias ocasiones hubo saturaciones mayores al 100% (Cuadro 2). La distribución de las concentraciones de los nutrientes reflejó los patrones usuales para sistemas estuarinos, con influencia del aporte de los ríos. La concentración

de fosfato, PO_4^{3-} fue la más consistente en cuanto a alcanzar valores superiores conforme se descende por la columna de agua, tanto en la estación lluviosa como en la seca. Así, en la estación lluviosa en los sitios del sector del extremo noroeste (Rincón), el valor más alto fue 2.35 μ mol/L a 140m en GD1 y 2.77 μ mol/L a 140m en GD2. En los sitios del litoral noreste, GD3, los valores más altos se presentaron entre los 80m y los 140m, con 2.60 μ mol/L y 1.60 μ mol/L, respectivamente, y en GD4, donde el fondo se alcanzó entre los 60m y 70m, de nuevo en ese ámbito la concentración de fosfato llegó a sus valores más altos, por ejemplo 2.01 μ mol/L a 70m. En la ribera suroeste (Puerto Jiménez, GD5), que se visitó solo una vez, la concentración de fosfato fue más alta a los 80m (1.74 μ mol/L). En la estación seca en GD1 la concentración de fosfato más alta ocurrió a los 140m (2.63 μ mol/L), y aunque en GD2 fue a los 30m (2.56 μ mol/L), a los 140m la concentración fue también alta, 2.12 μ mol/L PO_4^{3-} . En los sitios del litoral noreste, GD3 y GD4, también se observó el incremento en las concentraciones de fosfato con la profundidad.



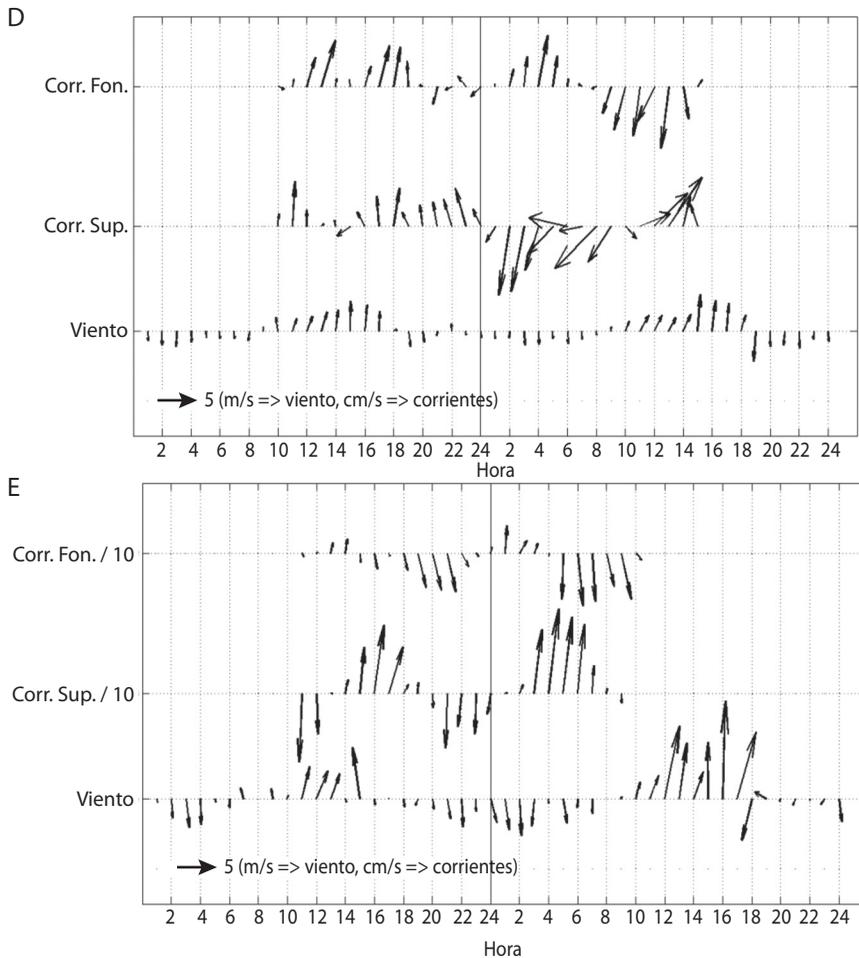


Fig. 12. Vectores para los datos horarios del viento observado en la estación de Golfito y las corrientes medidas en la superficie y el fondo del anclaje para los días (a) 03-04/11/2005, (b) 28/02/2006, (c) 25-26/07/2006, d) 14-15/02/2007 y e) 18-19/07/2007.

Fig. 12. Vectors for hourly wind observed at Golfito station and the surface and bottom currents at the mooring for the days (a) 03-04/11/2005, (b) 28/02/2006, (c) 25-26/07/2006, d) 14-15/02/2007 and e) 18-19/07/2007.

Las concentraciones de silicato en el manto superficial (0-1m) fueron por lo general más altas, comparadas con los valores del fondo, durante la estación lluviosa. Durante esta estación en el sector noroeste el valor más alto fue de 82.1 μ mol/L en GD1 y de 52.1 μ mol/L en GD2 y en la estación seca la concentración de este nutrimento decreció entre un 80% y 90% (Cuadro 2). En ambas estaciones las concentraciones de nitrato fueron más altas que las de nitrito, y aunque por lo general se detectó

un incremento hacia el fondo, sus gradientes verticales no siguieron siempre un esquema claramente definido o repetitivo (Cuadros 2 y 3). En la Fig. 13, 14 y 15 se observa una mezcla de los constituyentes físicoquímicos en la capa superior (0-60m), con desviaciones de los promedios de los datos en algunos casos muy altos debido a la magnitud del gradiente; en otros, sobre todo en la capa del fondo, la poca variabilidad se reflejó con incertidumbres pequeñas (Cuadros 4, 5, 6).

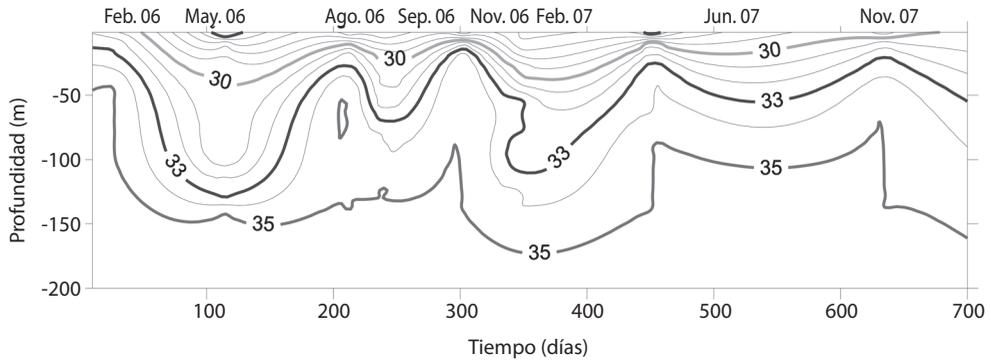


Fig. 13. Distribución temporal de la salinidad (ups) en el sitio GD3, en la entrada a la Bahía de Golfito, coordenadas 08°35.806' N - 083°14.053' W, Golfo Dulce, Costa Rica, durante el periodo de febrero de 2006 a noviembre de 2007.
Fig. 13. Temporal distribution of salinity (ups) in the station GD3, entrance to Golfito Bay, coordinates 08°35.806' N - 083°14.053' W, Golfo Dulce, Costa Rica, during the period February 2006 to November 2007.

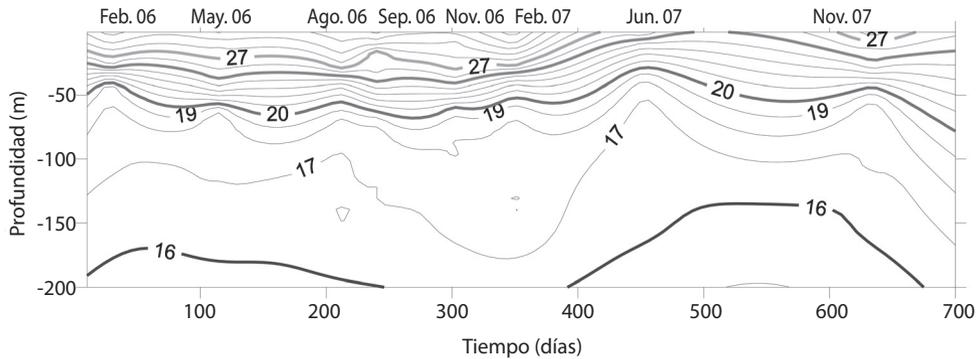


Fig. 14. Distribución temporal de la temperatura (°C) en el sitio GD3, en la entrada a la Bahía de Golfito, coordenadas 08°35.806' N - 083°14.053' W, Golfo Dulce, Costa Rica, durante el periodo de febrero de 2006 a noviembre de 2007.
Fig. 14. Temporal distribution of temperature (°C) in the station GD3, entrance to Golfito Bay, coordinates 08°35.806' N - 083°14.053' W, Golfo Dulce, Costa Rica, during the period February 2006 to November 2007.

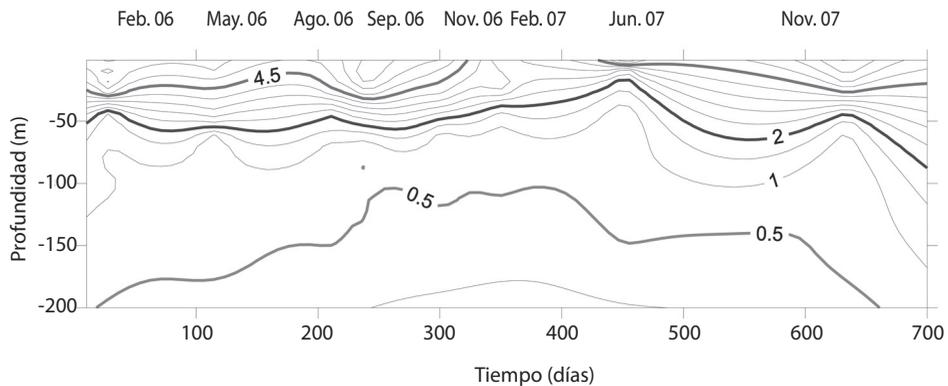


Fig. 15. Distribución temporal de la concentración de oxígeno disuelto (mg/L) en el sitio GD3, en la entrada a la Bahía de Golfito, coordenadas 08°35.806' N - 083°14.053' W, Golfo Dulce, Costa Rica, de febrero de 2006 a noviembre de 2007.
Fig. 15. Temporal distribution of dissolved oxygen concentration (mg/L), in the station GD3, entrance to Golfito Bay, coordinates 08°35.806' N - 083°14.053' W, Golfo Dulce, Costa Rica, during the period February 2006 to November 2007.

CUADRO 3

Caracterización fisicoquímica de la capa superficial (0 a 1m) del agua de los sectores noreste y suroeste del Golfo Dulce, Costa Rica, en las estaciones lluviosas y secas de 2006-2007. Coordenadas: GD3 (08°35.806' N - 083°14.053' W), GD4 (08°34.259' N - 083°11.261' W), GD5 (08°33.300' N - 083°18.098' W)

TABLE 3

Physical-chemical characterization of the surface layer (0-1m) of water from the northeast and southwest sectors of the Golfo Dulce, Costa Rica, in the rainy and dry seasons of 2006-2007. Coordinates: GD3 (08°35.806' N - 083°14.053' W), GD4 (08°34.259' N - 083°11.26' W), GD5 (08°33.300' N - 083°18.098' W)

Sitio	Estación lluviosa										
	GD3			GD4			GD5				
Mes, año	May. 2006	Ago. 2006	Nov. 2006	May. Jun 2007	Nov. 2007	May. 2006	Ago. 2006	Nov. 2006	May. Jun 2007	Nov. 2007	Oct. 2006
PSecchi (m)	7.3	4.3	5.0	2.5	3.3	4.0	3.3	1.00	0.5	3.5	4.3
S (ups)	23	26	26	15	28	27	26	26	10	29	29
T (°C)	30.1	30.4	30.2	27.1	29.0	28.9	29.5	29.4	26.9	28.5	29.5
O.D. (mg/L)	5.70	5.10	5.50	6.60	6.60	5.10	5.20	5.10	5.20	6.55	5.50
Sat. (%)	95.5	87.4	93.9	99.6	111.2	85.3	87.5	85.7	76.0	109.9	94.1
M.S. (mg/L)	10.10	18.01	13.04	12.79	8.26	31.18	22.32	24.02	29.08	12.46	25.41
Chl-a (mg/m ³)	0.77	0.59	0.35	4.35	1.22	1.09	0.64	0.92	2.44	0.61	0.17
Fosfato	0.36	0.28	0.24	0.29	0.28	0.34	0.33	0.81	0.65	0.13	0.13
Silicato	25.0	31.3	19.5	68.3	44.9	35.1	30.1	70.3	39.9	9.72	22.8
Nitrito	nd	nd	nd	0.16	0.13	0.04	nd	0.08	0.11	nd	0.05
Nitrato	0.81	nd	0.19	<0.12	<0.11	2.69	0.32	2.18	2.63	<0.25	0.23

Sitio	Estación seca			
	GD3		GD4	
Mes, año	Feb. 2006	Feb. 2007	Feb. 2006	Feb. 2007
PSecchi (m)	5.10	>12	7.25	>12
S (ups)	31	26	27	27
T (°C)	30.5	32.5	29.9	31.0
O.D. (mg/L)	6.10	3.00	6.00	5.20
Sat. (%)	107.6	53.5	102.3	90.6
M.S. (mg/L)	14.70	10.89	13.72	13.58
Chl-a (mg/m ³)	0.42	0.19	0.39	0.47
Fosfato	0.19	0.10	0.22	1.13
Silicato	5.29	<0.83	5.32	<0.75
Nitrito	0.08	nd	0.12	nd
Nitrato	nd	0.16	0.33	0.14

Simbología: PSecchi=Profundidad de observación del disco Secchi, S=Salinidad, T=Temperatura, O.D.=Concentración de oxígeno disuelto, Sat.=Saturación de oxígeno disuelto, M.S.=Materiales en suspensión, Chl-a=Clorofila-a. La concentración de nutrientes en mmol/L; nd=no detectado; entre el límite de detección y de cuantificación del método.

Legend: PSecchi=depth observation Secchi disk, S=Salinity, T=temperature, DO=dissolved oxygen concentration, Sat=saturation dissolved oxygen, suspended MS=Materials, Chl-a=chlorophyll-a. The concentration of nutrients in mmol/L, nd=not detected; between the limit of detection and quantification of the method.

CUADRO 4

Caracterización fisicoquímica del agua del sector noroeste del Golfo Dulce (Rincón), Costa Rica, en las estaciones lluviosas de 2005-2007, y secas de 2006-2007. Coordenadas: GD1 (08°42.492' N - 083°27.088' W), GD2 (08°40.911' N - 083°23.272' W)

TABLE 4

Physical - chemical water characterization northwest side of the Golfo Dulce (Rincón), Costa Rica, in the rainy seasons of 2005-2007 and 2006-2007 dry. Coordinates: GD1 (08 °42.492' N - 083 °27.088' W), GD2 (08 °40.911' N - 083° 23.272' W)

GD1+GD2	Estación lluviosa					Estación seca					
	0-60m	Promo	DvE	n	Máximo	Mínimo	Prom	DvE	n	Máximo	Mínimo
S (ups)	31.1	3.3	35	35	20	33.2	1.7	26	35	30	
T (°C)	25.4	4.0	35	31.4	17.1	22.6	5.1	26	31.0	17.1	
O.D. (mg/L)	3.8	1.9	35	7.30	0.84	2.4	1.9	26	5.60	0.40	
M.S. (mg/L)	12.7	3.6	35	18.82	6.37	11.4	1.0	26	13.07	9.11	
Chl- <i>a</i> (mg/m ³)	0.23	0.27	34	1.42	nd	0.65	0.65	26	2.65	0.02	
Fosfato	0.76	0.61	35	2.01	0.09	1.27	0.93	26	2.56	0.02	
Silicato	12	17	33	82.1	nd	15	10	26	29.7	nd	
Nitrito	0.16	0.34	35	1.82	nd	0.38	0.35	26	1.27	nd	
Nitrato	5.2	6.0	35	17.61	nd	6.2	6.4	24	20.64	nd	
70-140m											
S (ups)	34.9	0.3	36	35	34	34.8	0.4	20	35	34	
T (°C)	17.34	0.44	36	18.5	16.6	17.2	0.26	20	17.6	16.8	
O.D. (mg/L)	0.76	0.11	36	0.90	0.50	0.78	0.12	20	0.95	0.60	
M.S. (mg/L)	15.2	4.1	36	23.02	7.96	11.8	1.3	20	15.89	9.91	
Chl- <i>a</i> (mg/m ³)	0.01	0.04	33	0.21	nd	0.07	0.08	20	0.29	nd	
Fosfato	2.11	0.26	36	2.77	1.67	2.06	0.40	20	2.63	1.36	
Silicato	25.4	7.1	36	40.7	9.49	26.9	7.5	20	38.8	13.8	
Nitrito	0.24	0.30	35	1.13	nd	0.42	0.38	18	1.18	nd	
Nitrato	9.1	4.6	36	16.30	0.84	7.7	4.2	20	16.77	1.11	

Simbología: S=Salinidad, T=Temperatura, O.D.=Concentración de oxígeno disuelto, M.S.=Materiales en suspensión, Chl-*a*=Clorofila-*a*. La concentración de nutrientes en mmol/L; DvE= Desviación estándar, n=número de mediciones, nd=no detectado; entre el límite de detección y de cuantificación del método.

Legend: S=Salinity, T=temperature, OD=Concentration of dissolved oxygen, suspended MS = Materials, Chl-a = chlorophyll-a. The concentration of nutrients in mmol/L; PVS=standard deviation, n=number of measurements, nd=not detected; between the limit of detection and quantification of the method.

En la estación lluviosa el promedio de la salinidad en el estrato del fondo aumentó entre un 8% y un 12% con respecto a la capa superficial, a la vez que para la temperatura bajó alrededor de un 30%. Por razones obvias las disminuciones de la O.D. y de la Chl-*a* fueron más pronunciadas: la O.D. promedio descendió en un 80% y la Chl-*a* promedio alrededor del 95%. En el sector suroeste, GD5 (Puerto Jiménez) solo se registraron datos en la estación lluviosa para la capa superficial y esta presentó promedios ligeramente más altos que los de los otros dos sectores incluidos en este trabajo para la salinidad promedio (32.6ups±2.3ups).

El promedio de la temperatura (24.9°C±4.2) estuvo dentro del ámbito de los valores promedios determinados para los otros cuatro sitios GD1 a GD4. Los materiales en suspensión fueron mayores en las capas del fondo en un ámbito del 8% al 29% en la estación lluviosa, pero en la estación seca la variación fue menor en GD1 y GD2, registrándose una disminución del 14% en GD3.

En concordancia con las distribuciones verticales determinadas para los nutrientes, al separar en dos capas la columna de agua, los nutrientes fosfato, silicato, nitrito y nitrato, presentaron promedios más altos en las capas

del fondo en ambas estaciones climáticas en GD1 y en GD2 (Cuadro 4). En GD3 se repitió este patrón excepto para nitrito (Cuadro 5) y en GD4 debido a que fue el sitio más somero en el que la base del fondo se alcanzó entre los 60m y 70m, solo se registraron valores en la capa superficial (Cuadro 6).

En relación con el zooplancton, la Fig.16 muestra los valores de biomasa obtenidos en los diferentes sitios de muestreo, tanto de los arrastres verticales como horizontales. Para los arrastres verticales, en Rincón (GD1 y GD2) los valores de biomasa fueron cualitativamente menores (mín: 0.74mgPS*m⁻³, máx:

37.5mgPS*m⁻³) al compararlos con los de GD4 (mín: 4.46mgPS*m⁻³ máx: 71.18mgPS*m⁻³). Sin embargo, para la parte interna del Golfo, en algunos meses la biomasa se concentró en el estrato más profundo; en otros en la superficie y en el estrato intermedio (termoclina). De igual manera, en la mayoría de los meses de muestreo (5 de 7), la biomasa horizontal superó la biomasa vertical en casi todas las estaciones, excepto en las estaciones GD1 y GD2, en marzo del 2007. Para otras estaciones (GD3 febrero 2007 y GD4 febrero 2006), los valores de biomasa horizontal fueron menores que aquellos verticales.

CUADRO 5

Caracterización fisicoquímica del agua del sector noreste del Golfo Dulce, Costa Rica, en las estaciones lluviasas y secas de 2006-2007. GD3 (08°35.806' N - 083°14.053' W)

TABLE 5

Physical - chemical water characterization northeast sector of Golfo Dulce, Costa Rica, in the rainy and dry seasons of 2006-2007. GD3 (08°35.806' N - 083°14.053' W)

GD3	Estación lluviasa					Estación seca				
	Prom	DvE	n	Máximo	Mínimo	Prom	DvE	n	Máximo	Mínimo
0-60m										
S (ups)	30.2	4.6	35	35	15	31.6	3.2	14	35	26
T (°C)	24.1	4.3	35	30.4	16.8	24.7	5.3	14	32.5	17.9
O.D. (mg/L)	3.3	1.9	35	6.60	0.70	3.1	1.9	14	6.20	0.80
M.S. (mg/L)	13.8	4.3	35	23.07	8.26	12.5	3.6	13	20.38	8.10
Chl-a (mg/m ³)	0.50	0.78	35	4.35	nd	0.50	0.33	13	1.12	0.15
Fosfato	0.80	0.61	35	2.07	0.10	0.64	0.61	13	1.81	0.07
Silicato	12	15	35	68.3	nd	5.5	6.4	13	18.6	nd
Nitrito	0.22	0.31	35	1.40	nd	0.19	0.29	13	1.00	nd
Nitrato	6	6	31	17.21	nd	4.2	5.4	13	12.77	nd
70-140m										
S (ups)	32.7	3.3	40	36	26	33.4	1.1	10	35	32
T (°C)	17.1	0.6	40	18.7	16.0	17.8	0.53	10	18.3	16.5
O.D. (mg/L)	0.70	0.15	40	0.90	0.30	0.61	0.29	10	1.10	0.15
M.S. (mg/L)	14.9	5.3	40	25.62	8.21	10.8	1.5	10	14.60	9.80
Chl-a (mg/m ³)	0.03	0.06	40	0.21	nd	0.08	0.06	10	0.15	nd
Fosfato	1.85	0.39	40	2.60	0.66	1.41	0.47	10	2.34	0.78
Silicato	23.4	5.6	40	35.2	13.9	16.3	5.3	10	27.2	10.4
Nitrito	0.05	0.08	34	0.28	nd	0.05	0.06	10	0.16	0.02
Nitrato	9.3	3.5	40	19.05	3.08	8.4	4.6	10	16.69	2.03

Simbología: S=Salinidad, T=Temperatura, O.D.=Concentración de oxígeno disuelto, M.S.=Materiales en suspensión, Chl-a=Clorofila-a. La concentración de nutrientes en mmol/L; DvE= Desviación estándar; n=número de mediciones, nd=no detectado; entre el límite de detección y de cuantificación del método.

Legend: S=Salinity, T=temperature, OD=Concentration of dissolved oxygen, suspended MS=Materials, Chl-a=chlorophyll-a. The concentration of nutrients in mmol/L; PVS=standard deviation, n=number of measurements, nd=not detected; between the limit of detection and quantification of the method.



CUADRO 6

Caracterización fisicoquímica del agua del sector noreste de Golfo Dulce, Costa Rica, en las estaciones lluviosas y secas de 2006-2007. GD 4 (08°34.259' N - 083°11.261' W)

TABLE 6

Physical - chemical water characterization northeast sector of Golfo Dulce, Costa Rica, in the rainy and dry seasons of 2006-2007. GD 4 (08°34.259' N - 083°11.261' W)

GD4 0-60m	Estación lluviosa					Estación seca				
	Promo	DvE	n	Máximo	Mínimo	Prom	DvE	n	Máximo	Mínimo
S (ups)	31.6	5.2	37	36	10	30.7	2.9	15	36	27
T (°C)	23.4	4.2	37	29.7	17.2	23.2	4.6	15	31.0	17.6
O.D. (mg/L)	3.2	1.8	37	6.55	0.60	3.2	1.8	15	6.00	1.20
M.S. (mg/L)	17.6	5.7	37	31.18	10.24	13.0	1.3	14	15.00	10.82
Chl- <i>a</i> (mg/m ³)	0.37	0.48	36	2.44	nd	0.47	0.22	14	1.01	0.08
Fosfato	0.81	0.57	37	2.01	0.11	0.99	0.55	12	1.70	0.22
Silicato	15	14	32	70.3	nd	8.6	6.1	12	18.0	1.13
Nitrito	0.17	0.27	31	1.03	nd	0.53	0.41	9	1.27	0.08
Nitrato	6.6	5.1	34	18.51	nd	6.3	5.0	13	17.15	nd

Simbología: S=Salinidad, T=Temperatura, O.D.=Concentración de oxígeno disuelto, M.S.=Materiales en suspensión, Chl-*a*=Clorofila-*a*. La concentración de nutrientes en mmol/L; DvE= Desviación estándar; n=número de mediciones, nd=no detectado; entre el límite de detección y de cuantificación del método.

Legend: S=Salinity, T=temperature, OD=Dissolved oxygen concentration, suspended MS=Materials, Chl-*a*=chlorophyll-*a*. The concentration of nutrients in mmol/L; PVS=standard deviation, n=number of measurements, nd=not detected; between the limit of detection and quantification of the method.

En el plano vertical, independientemente de la fecha, los mayores valores siempre se obtuvieron en la capa de mezcla, aunque valores importantes de biomasa se presentaron en la termoclina (GD1, GD3, GD4). Con respecto a los arrastres horizontales, éstos revelaron, en tendencia, biomazas más abundantes que en los arrastres verticales. En GD3 se obtuvo el valor más bajo durante todo el periodo de estudio (mín: 3.58mgPS*m⁻³), mientras que en GD1 se alcanzó el valor más alto (154.23mgPS*m⁻³, marzo de 2007). Otro valor significativamente alto fue encontrado en GD4 (107.17mgPS*m⁻³, junio de 2007). En relación con las abundancias del mesozooplankton, la Fig. 17 muestra los valores obtenidos en cada sitio, en los estratos determinados según la termoclina, además de las abundancias superficiales obtenidas del arrastre horizontal. Las abundancias fueron relativamente altas, en especial en la estación GD1 durante marzo del año 2007, donde se obtuvo una concentración de organismos aproximadamente de 25 000n*m⁻³, en el arrastre

horizontal, que coincidió a la vez con el valor de biomasa seca más alto obtenido durante todo el estudio. Otros valores importantes de abundancias se alcanzaron en GD4, casi 18 000n*m⁻³ en junio del año 2007, que igualmente coincidió con el segundo valor más alto de biomasa seca. Un valor similar en cuanto a abundancia resaltó para GD3 en mayo del año 2006. Las mayores concentraciones de zooplankton se dieron en los arrastres horizontales, excepto para los meses de septiembre (ambos años) en los sitios de muestreo internos, donde las mayores concentraciones se dieron en el primer estrato vertical. La mayor concentración vertical se obtuvo por lo general en la capa de mezcla, que correspondió al primer estrato, como se aprecia claramente en GD3 y GD4. Sin embargo, este patrón no fue tan definido para GD1 y GD2, lo cual podría deberse a condiciones oceanográficas diferenciales que gobiernan el desarrollo de las poblaciones de zooplankton en ambos sitios. Los copépodos fueron siempre el grupo dominante con porcentajes que variaron entre

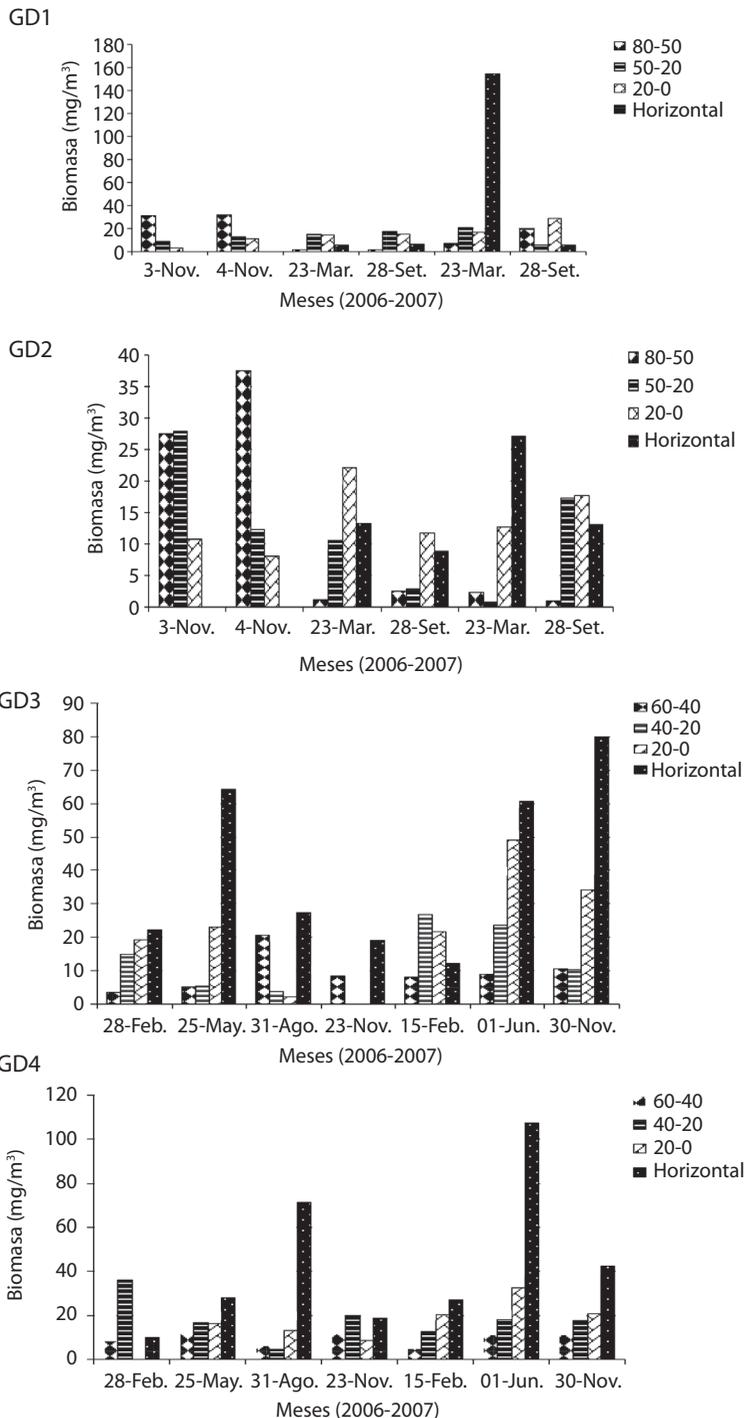


Fig. 16. Valores de biomasa peso seco del mesozooplankton ($\text{mgPS}\cdot\text{m}^{-3}$) según el estrato de muestreo (m), y los diferentes sitios de muestreo, en el Golfo Dulce, noviembre 2005, noviembre 2007.

Fig. 16. Dry weight biomass values of mesozooplankton ($\text{mgDW}\cdot\text{m}^{-3}$), depending sampling stratum (m) in the different stations, Golfo Dulce, November 2005, November 2007.

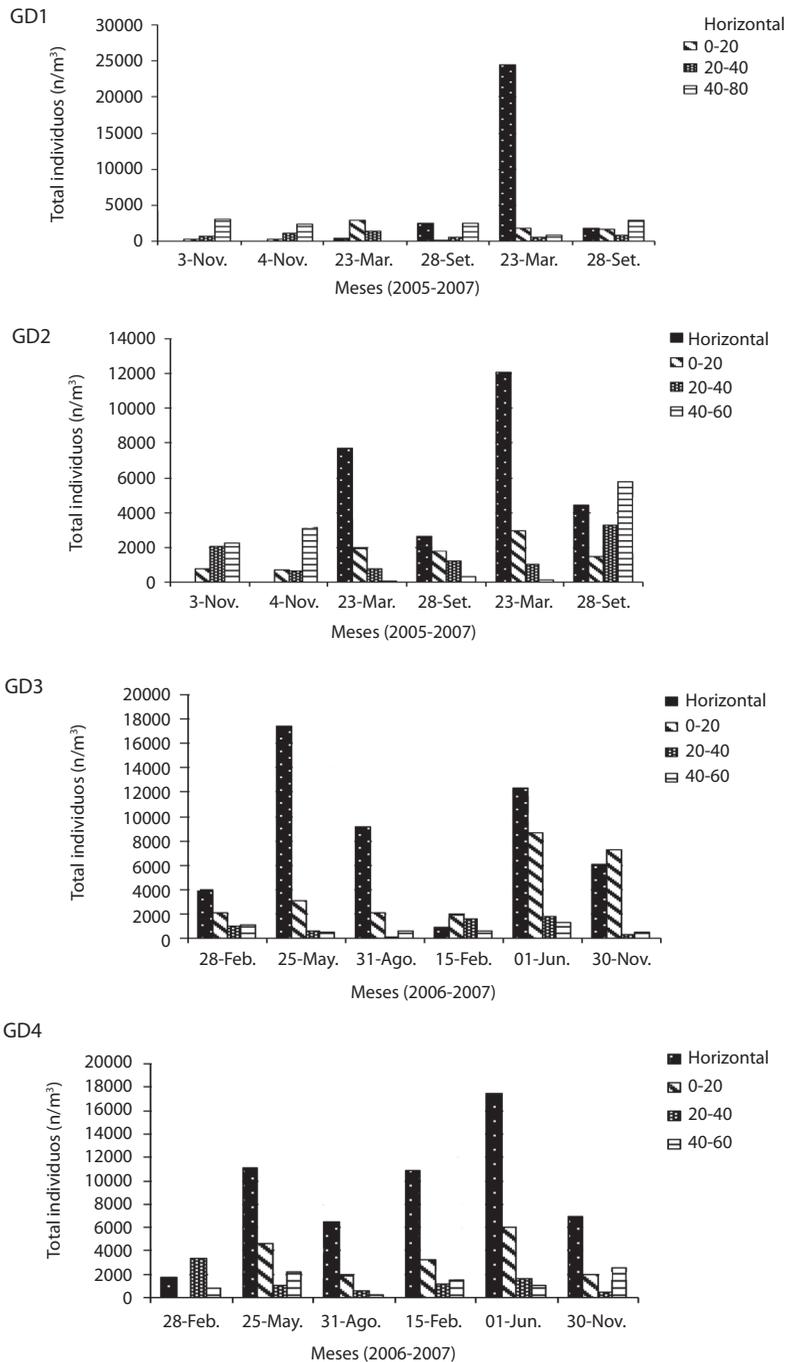


Fig. 17. Abundancias totales ($\text{ind}\cdot\text{m}^{-3}$) del mesozooplankton, según estrato de muestreo (m), en las estaciones de muestreo en el Golfo Dulce, de noviembre 2005 a setiembre 2007.

Fig. 17. Total abundances ($\text{ind}\cdot\text{m}^{-3}$) of mesozooplankton, depending sampling stratum (m), in the stations of Golfo Dulce, from November 2005 to September 2007.

44% y 83,6%. Los copépodos más comunes fueron especies de ciclopoideos, del género *Corycaeus*, *Oncaea mediterranea*, *Oithona plumifera* y calánidos como *Acrocalanus gibber*, *Canthocalanus pauper*, *Paracalanus parvus*, *P. aculeatus* y *Centropages furcatus*. Menos comunes fueron especies de las familias Eucalanidae y Euchaetidae. El segundo grupo más común fue el constituido por las apendicularias (*Oikopleura* sp. y *Frittilaria* sp), y las especies de ostrácodos *Cypridina americana* y *Euconchaecia chierchiae* formaron el tercer grupo, siendo la primera por lo general la más común y con un fuerte comportamiento migratorio (Morales-Ramírez & Jacob, 2008). Estos tres grupos fueron los dominantes en estudios previos (Quesada & Morales-Ramírez, 2006). Otros grupos importantes fueron los quetognatos y los pterópodos del género *Cuvierina*.

DISCUSIÓN

Corrientes marinas: De acuerdo con el estudio realizado, las corrientes marinas en el interior del Golfo Dulce son relativamente débiles (máximos de 0.19m/s). Observando la dirección del flujo de las corrientes y el estado de la marea, no se nota un patrón definido en la capa superficial, que no tiene correlación con el flujo en el fondo, y tampoco tiene relación con las fases de la marea. Esta característica refuerza el hecho de que la estructura morfológica distintiva del Golfo Dulce corresponde a la de un estuario tipo fiordo (Knauss, 1978; Fairbridge, 1980; Hebbeln et al., 1996; Acuña-González, Vargas-Zamora & Córdoba 2006), con una cuenca profunda en su interior y una relativa baja profundidad en la salida hacia mar abierto (Fig. 1). El flujo fue más intenso (máximos de 0.40m/s) en la entrada de Bahía Golfito, lo cual era de esperar con la compresión lateral que representa el canal de la bahía al salir al Golfo Dulce. Las corrientes más rápidas (máximos de 0.45m/s). En esta zona, la dirección de las corrientes mostró un poco más de coherencia entre el flujo superficial y el del fondo con las mareas, dado que durante la marea subiendo hubo un flujo hacia el interior del golfo,

mientras que durante la marea bajando, fue un flujo hacia el exterior del golfo. En algunos momentos se pudo identificar una estratificación de flujo en la columna de agua (distintas direcciones arriba y abajo), por ejemplo: alrededor de las horas 6 y 24 de la Fig. 6. Esta estructura fue común, y más sostenida en el tiempo, en el estudio de Svendsen et al. (2006).

Oleaje y meteorología: En general, el oleaje en el Pacífico Sur de Costa Rica es de origen remoto (Lizano, 2007), como lo demuestra la Fig. 7. Prácticamente, toda la energía de esas olas se disipa en la entrada de Golfo Dulce. Por esta razón es que el interior del golfo es un espejo de agua que la mayor parte del tiempo no tiene rugosidad; es usualmente un espejo plano cuando no sopla viento. Eventos locales como tormentas afuera del golfo, o efectos indirectos de huracanes en el Caribe, pueden generar oleaje en el interior del golfo, que junto con viento local, y las corrientes que forjan, representen quizás, el único mecanismo de mezcla de estas aguas. La energía promedio de las olas (representada en este caso por su altura) fue mayor a partir del mes de mayo, justo cuando los vientos oestes ecuatoriales (Zárate, 1978; Muñoz, Fernández, Gutiérrez & Zárate, 2002b), soplan hacia la costa (u y v positivos en Fig. 8A). Alturas significativas de olas de 2.92m fueron identificadas en el estudio de Lizano (2013), lo que indica la posibilidad de tener una altura de ola máxima de alrededor de 5m mar adentro frente a esta región.

El ciclo anual de la precipitación en la estación meteorológica de Golfito mostró un patrón bimodal, típico de la vertiente Pacífica de América Central, con máximos en los meses de mayo y octubre; este segundo el mayor de ellos. Se observó una disminución de la precipitación entre mayo y octubre, en donde típicamente se encuentra el periodo conocido como veranillo o canícula. El mes de mínima precipitación fue el de febrero. Este ciclo anual coincidió con lo mostrado por Herrera (1985) y Fallas y Oviedo (2003), como una región de pluviosidad alta. La TSA mostró una diferencia

de aproximadamente 1°C a lo largo del año con la TSM. Se observó que sus valores máximos durante los meses de marzo y abril anteceden al primer pico de las lluvias y de TSM de mayo. Este retardo de la TSM con respecto a la TSA también se observó en sus valores mínimos, ya que las temperaturas más bajas de la TSA antecedieron en dos meses a los de la TSM. Los resultados mostrados asociados a los ciclos anuales en el Golfo Dulce deben ser interpretados bajo un escenario de cambio climático al igual que lo encontrado por Alfaro et al. (2012) para Bahía Culebra en la región del Pacífico Norte, ya que estos están asociados a un calentamiento ocurrido desde el año 1854, coherente con lo observado globalmente. Los valores de la intensidad del viento mostraron muy poca relación con los de las corrientes, debido a que principalmente se observó la existencia de sistemas mesoescalares relacionados con los sistemas de brisa marina y terrestre (Holton, 2004), es decir, una predominancia de vientos desde el mar conforme avanza el calentamiento diurno y hacia el mar en horas de la noche, principalmente.

Oceanografía química y zooplancton:

Una de las características de las aguas del Golfo Dulce es la distribución de la concentración de oxígeno disuelto (O.D.). Richards et al. (1971) describieron que conforme se avanza hacia el fondo en la columna de agua de la parte interna de este golfo, se presenta una disminución rápida de la O.D., al igual que se manifiesta la desnitrificación y la reducción del ion nitrato, y la aparición de un segundo máximo en la concentración de ion nitrito. Este mismo patrón de distribución vertical fue detectado de nuevo varios años después por Thamdrup et al. (1996), Córdoba y Vargas (1996) y Acuña-González et al. (2006). La reducción en la O.D. está asociada con la masa de agua salada en la profundidad, que avanza muy despacio y que recibe un aporte significativo y gradual de materiales orgánicos, M.O., desde las capas superficiales de la columna de agua. Los M.O. están constituidos por sustancias químicas complejas de diverso origen; entre ellas una de

las más importantes es la que resulta de obtener el promedio estadístico de la composición del plancton: $(\text{CH}_2\text{O})_{106}(\text{NH}_3)_{16}\text{H}_3\text{PO}_4$ (Richards, Cline, Broenkow & Atkinson, 1965). Cuando el plancton muere y se hunde en la columna de agua, se descompone mediante el consumo del oxígeno disuelto, ya sea por la intervención de microorganismos, o por reacciones típicas de oxidación-reducción, con lo cual se liberan CO_2 , H_2O , NO_3^- y PO_4^{3-} . Cuando ya no haya oxígeno disuelto, el ion nitrato y luego el ion sulfato serán utilizados en el proceso de oxidación, por lo que tendría lugar la formación de sulfuros durante la prevalencia de las condiciones anóxicas en las profundidades del golfo. Estas revertirán en el momento en que alguna masa de agua densa y oxigenada se introduzca por el umbral del límite oceánico y se mezcle con el agua residente (Richards et al., 1971; Thamdrup et al., 1996; Kuever, Wawer & Lilleback, 1996). Sin embargo, durante las fechas de toma de muestras de esta investigación, no se detectó la ausencia de oxígeno disuelto en las aguas profundas del Golfo Dulce, aunque las concentraciones llegaron a ser bajas, en el ámbito de 0.25mg/L a 1.10mg/L. En este estudio destacó, por ejemplo, que en los dos sitios del sector de Rincón, GD1 y GD2, la capa de agua de los 70m a los 140m de profundidad presentó una O.D. promedio de 0.76mg/L (Cuadro 4) durante la estación lluviosa, la cual no fue significativamente diferente al nivel del 95% con respecto al promedio del periodo de la estación seca, de 0.78mg/L. El ámbito de la O.D. para esta capa de agua en la estación lluviosa fue similar a la que se registró en la estación seca (Cuadro 4). Estos resultados fueron congruentes con los determinados para el sitio GD3 (Cuadro 5) y en GD4 solo se contó con la capa superficial (Cuadro 6). En el Cuadro 4 se observa que en la capa superficial de GD1 y GD2, al comparar los promedios de salinidad de la estación lluviosa, se manifestó el efecto de la dilución provocada por la mezcla con el agua dulce de las lluvias y de los ríos, mientras que en la capa del fondo los promedios de salinidad fueron altos y prácticamente constantes. Este mismo patrón se presentó en

GD3 (Cuadro 5). Desde el punto de vista de las concentraciones de nutrimentos consideradas en este trabajo, se deduce que el Golfo Dulce puede ser considerado como un cuerpo de agua que se mantiene en un estado de muy buena calidad ambiental. Refuerza esta aseveración el ámbito de concentraciones de clorofila-*a* (Cuadros 2 y 6).

La concentración vertical del zooplancton durante este estudio fue mayor, generalmente, en la capa superior (por encima de la termoclina), aunque se dieron excepciones en algunos meses en GD2 (parte interna) y GD4 (boca del Río Coto-Colorado). De igual manera, la biomasa vertical fue usualmente mayor en el estrato superior. Con muy pocas excepciones, tanto la biomasa como la abundancia del zooplancton durante el periodo de estudio, fue mayor en los arrastres horizontales que verticales. La formación de parches en la superficie a cualquier escala, es un rasgo característico del zooplancton costero y oceánico, los cuales se establecen bajo la influencia de procesos físicos, que en el caso de un plano horizontal se dan gracias a la instauración de frentes y remolinos, y en un plano vertical por la presencia de la termoclina y del afloramiento de aguas profundas (Steele & Henderson, 1992). Por otra parte, el tamaño y forma de las agregaciones pueden diferir entre localidades, especies e inclusive entre estadios de desarrollo de una especie (Wiafe & Frid, 1996). La organización espacial y temporal de las comunidades pláncnicas en el ambiente pelágico de los océanos es, por lo tanto, muy dinámica (Smetacek, 1988). Lo anterior es producto de una combinación de efectos de los factores físicos sobre las especies, así como de los procesos biológicos característicos de cada especie (ej. reproducción) (Harris, 1987; Longhurst & Pauly, 1987).

El haber encontrado en el plano vertical, cualitativamente mayores abundancias y biomasa en las capas superiores, es un patrón reportado también para otras regiones de mundo (Böttger-Schnack, 1994, 1995; Saltzman & Wishner, 1997a, 1997b) y previamente para el Golfo Dulce durante un fenómeno de El Niño (Quesada-Alpizar & Morales-Ramírez,

2006). La distribución vertical en este estudio se asocia a los fuertes gradientes verticales en las variables físico-químicas, como lo demuestran los resultados del componente de oceanografía química y lo demuestran otros trabajos anteriores (Córdoba & Vargas, 1996; Thandrup et al., 1996; von Wangelin & Wolff, 1996) y que se explican por la morfología del golfo. Para los ostrácodos del Golfo, un estudio sobre su comportamiento migratorio reveló patrones diurnos diferenciales según sexo y estadio de desarrollo (Morales-Ramírez & Jacob, 2008). La capa superficial se distingue por una relativamente alta temperatura y concentración de oxígeno disuelto, lo cual favorece la alta concentración y biomasa de zooplancton observada. Al respecto, Madhupratap, Srekumaran, Haridas, y Padmavati (1990), en su estudio en el Indo-Pacífico, encontraron que el zooplancton se concentra en la capa sobre la termoclina, presentando biomasa y densidades hasta cinco veces superiores a aquellas por debajo de la termoclina. Por otro lado, Longhurst (1985), en su estudio en el Pacífico Tropical Oriental, determinó la existencia de una fuerte planctoclina, separando el epiplancton en las capas superiores del mesoplancton en las capas profundas. Otro factor que favorece la concentración del zooplancton en la capa superficial se relaciona con la concentración del fitoplancton en la superficie y hasta una profundidad de 40m (Kuever et al., 1996). Por debajo de esta profundidad el fitoplancton es escaso y en su mayor parte corresponde a células muertas y bacterias. En el estudio de Quesada-Alpizar y Morales-Ramírez (2006), los copépodos dominaron las abundancias con un 71.45%, seguidos de las apendicularias (8.25%) y los ostrácodos (7.99%); la dominancia fue homogénea en la capa superficial de todos los sitios de muestreo. En este estudio, de igual manera los porcentajes de dominancia fueron en el mismo orden: copépodos (hasta un 83.6%), apendicularias y ostrácodos. A pesar de la fuerte estratificación biológica observada, la abundancia de zooplancton en el Golfo Dulce mostró valores que se pueden considerar entre bajos y moderados, al compararlos con los valores reportados para

otros sistemas (Cuadro 2, Quesada-Alpizar & Morales-Ramírez, 2006), aunque en este estudio, las abundancias verticales, en términos generales, fueron ligeramente superiores. Sin embargo, las biomásas verticales sí variaron de manera significativa, con valores entre 0.34 y 54.5mgPS*m³ en el estudio de 1997 y entre 0.74 y 71.18mgPS*m³ en el presente trabajo. Las biomásas horizontales fueron mayores, con valores hasta de 154.23mgPS*m³ (lo que correspondió a la más alta abundancia horizontal), un valor similar al encontrado en el Golfo de Nicoya en el año 1997 únicamente para la biomasa de copépodos herbívoros (146.8mgPS*m³) (Morales-Ramírez & Brugnolli, 2001). Bajo estas consideraciones, pareciera que una fracción muy importante del mesozooplancton en el Golfo Dulce se encuentra distribuida en parches horizontales, algo que el estudio de Quesada-Alpizar y Morales-Ramírez (2006) no identificó, ya que su muestreo fue únicamente vertical. Se puede afirmar que las partes interna y externa de la cuenca se diferencian tanto biológica como físicamente. Lo anterior se puede explicar sobre la base de que las regiones externas son afectadas con mayor frecuencia por pulsaciones de agua oceánica profunda y rica en nutrientes (Richards et al., 1971; Thamdrup et al., 1996; von Wangelin & Wolff, 1996; Acuña-González et al., 2006, Quesada-Alpizar & Morales-Ramírez, 2006), una mayor incidencia de viento (mayor mezcla vertical) y la cercanía de la desembocadura del principal río de la cuenca de Golfo Dulce, el Coto-Colorado. Esto último representa una entrada importante de nutrientes al sistema en general y en la región externa en particular (Benovic, Fonda-Umani, Malej & Specchi., 1994; Umaña, 1998). De manera similar, la descarga de nutrientes de origen antrópico provenientes de la zona de Golfito podría ser la causa de las altas concentraciones de zooplancton en GD3, en la parte media de la cuenca (León-Morales & Vargas, 1998; Spongberg & Davis, 1998). Además, este sitio está expuesto a la influencia del Río Coto-Colorado. Sobre esto, se ha comprobado que la entrada de ríos puede acarrear grandes

cantidades de nutrientes a un sistema marino (Benovic et al., 1994; Umaña, 1998; Silva & Bonilla, 2015), lo que afectaría la productividad de la zona y estimularía indirectamente la alta abundancia de organismos zooplácticos observados en GD4. En un estudio de dos años, y ante la presencia de un fenómeno de El Niño, Quesada-Alpizar y Morales Ramírez (2004), detectaron flujos bianuales de masas de aguas frías, ricas en nutrientes y de alta salinidad, que provocaron diferencias significativas en las características hidrográficas entre la parte interna y externa del Golfo y proponen que estos eventos podrían estar relacionados con las mismas fuerzas que controlan el sistema de afloramiento costero en el Golfo de Panamá. Durante un evento El Niño (fase cálida del ENSO), se espera una disminución en la productividad primaria debido a la baja entrada de nutrientes (disminuye o cesa el afloramiento en las regiones del POT) lo cual afecta de manera directa e indirecta al zooplancton (White, Zang, Welling, Roman & Dam, 1995; Lavaniegos & Gonzalez-Navarro, 1999). Así el comportamiento del zooplancton en el Golfo Dulce pareciera ser lo suficientemente plástico como para adaptarse a condiciones normales (presente estudio) y a condiciones anómalas (El Niño), y en este último caso, mantener altas diversidades tanto de zooplancton gelatinoso (Morales-Ramírez & Nowaczyk, 2006) como de zooplancton no gelatinoso (Quesada-Alpizar & Morales Ramírez, 2006).

Como lo muestran los resultados de este artículo, podemos afirmar que el Golfo Dulce es un sistema que goza de una relativa buena salud ambiental, en parte reflejada en su alta diversidad biológica (Morales-Ramírez, 2013) y a pesar de las serias amenazas y presiones que la cuenca y sus ecosistemas asociados, han estado experimentando en los últimos años (Quesada-Alpizar & Cortés, 2006; Morales-Ramírez, 2013). Sin embargo, es oportuno indicar que las corrientes marinas en el interior del golfo son muy débiles y la energía del oleaje se disipa prácticamente al ingresar al Golfo Dulce. Esto demuestra que el golfo tiene una dinámica muy pobre, donde los tiempos

de residencia de las partículas es muy alto, y lo hace un cuerpo de agua muy sensible a la contaminación. Por otra parte los compuestos químicos disueltos en el agua de mar del Golfo Dulce, que contienen nitrógeno, fósforo y silicio en diferentes especies químicas, son nutrientes esenciales para el mantenimiento de la vida de los organismos que habitan o visitan este golfo. Las concentraciones de estas especies químicas están determinadas en primera instancia por la conjugación de procesos físicos y biogeoquímicos de la naturaleza, pero las actividades humanas en las comunidades aledañas al golfo juegan un papel muy importante, puesto que pueden implicar la alteración de los ciclos de los nutrientes en este ecosistema. Es primordial cuidar que las prácticas agrícolas de la zona impliquen un control de las descargas de fertilizantes y plaguicidas en todas aquellas vías que alcancen directa o indirectamente al golfo. También es fundamental plantearse mecanismos adecuados para evitar la inmediata descarga al golfo de aguas servidas, porque, como ya se dijo, los tiempos de residencia del agua en el golfo son prolongados. Se deben de hacer esfuerzos para mantener, bajo políticas de ordenamiento y planificación costera en un marco inter-institucional, un programa de investigación en el golfo y en sus cuencas hidrográficas, que permitan el monitoreo de su calidad ambiental mediante estudios de contaminación, uso del suelo, diversidad biológica, sedimentación, productividad biológica, dinámica pesquera y dinámica social participativa, que posibiliten la integración hacia la meta de una gestión integrada del Golfo Dulce para su conservación y el aprovechamiento sostenido de sus recursos por parte de las comunidades. Solo así podemos asegurarle a varias generaciones más, la gran belleza escénica y la integridad ecológica de este sistema único en el mundo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos los comentarios y sugerencias de revisores. A la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica por

el financiamiento a través de los proyectos 808-A9-180, 808-A5-228, 808-B0-040, 808-B0-654 y 805-A7-002 (apoyado por GEOF 02 2013-IPGH y CRN2050-IAI). Agradecemos a Eleazar Ruiz su apoyo en el trabajo de campo y al Programa Institucional de la Península de Osa (PIOSA) por el apoyo logístico en el desarrollo de nuestras investigaciones.

RESUMEN

Se indagó, de septiembre del 2005 a noviembre del 2007, las propiedades oceanográficas físicas, químicas y biológicas (zooplancton) más relevantes del Golfo Dulce, Pacífico Sur de Costa Rica, y las tipologías meteorológicas de la zona, con el objetivo de analizarlas y hacerlas disponibles como referencia en el establecimiento de actividades adecuadas para su conservación, dado que es un ecosistema acuático único en Costa Rica. El patrón de circulación de las aguas en el Golfo Dulce es el típico de estuarios tipo fiordo, con una estratificación de flujo en la columna de agua. Las corrientes marinas superficiales alcanzaron velocidades cercanas a los 18cm/s en la región de entrada al Golfo, que disminuyeron al ampliarse el área del golfo donde las velocidades llegaron a alcanzar poco más de 5cm/s en el extremo noroeste, Rincón. Predominó el flujo superficial de este-oeste, mientras que en la zona de Puerto Jiménez la velocidad fue moderada de 5.4cm/s con dirección sur. Se detectaron velocidades mayores cercanas al umbral de la entrada del golfo (17.8cm/s) y en el fondo el ámbito fue de 2.0cm/s a 4.8cm/s. Se establecieron cinco sitios de muestreo denominados GD1, GD2, GD3, GD4 y GD5, que se visitaron en cinco ocasiones, excepto en GD5 que se visitó solo una vez. No se detectó la ausencia de oxígeno disuelto en las aguas profundas del Golfo (70m a los 140m), aunque las concentraciones fueron bajas (0.25mg/L a 1.10mg/L). La distribución de las concentraciones de los nutrientes reflejó los patrones usuales para sistemas estuarinos a nivel horizontal, y a nivel vertical las concentraciones de fosfato y silicato fueron mayores al descender en la columna de agua, tanto en la estación lluviosa como en la seca. La descomposición de la materia orgánica fue evidente puesto que las concentraciones de nitrato fueron incrementándose en las aguas profundas. De los datos de concentración de nutrientes, se deduce que el Golfo Dulce puede ser considerado como un cuerpo de agua que se mantiene en un estado de muy buena calidad ambiental. El grupo zoopláctico dominante fue el de los copépodos (44%-83.6%). Los vientos oeste ecuatoriales se detectaron en junio y fueron más intensos entre septiembre y octubre, lo que correspondió con promedios altos de altura de las olas. A su vez, los vientos alisios de diciembre a abril disminuyeron la energía del oleaje que entra al golfo y por lo tanto la altura promedio de las olas. El ciclo anual de la precipitación fue un patrón bimodal típico del Pacífico de



América Central, con máximos en mayo y octubre, con la interrupción debida al veranillo o canícula, y un mínimo de precipitación ocurrió en febrero. Golfo Dulce es un ambiente único en todo el Pacífico Este Tropical, y aunque parezca mostrar condiciones ambientales saludables, está amenazado por muchas actividades humanas; ante todo urge el establecimiento de políticas de ordenamiento y planificación de las mismas, para proteger el ecosistema bajo los principios de uso sostenible.

Palabras clave: fiordo tropical, Pacífico Este Tropical, corrientes de agua, sistema de vientos, nutrimentos, zooplancton.

REFERENCIAS

- Acuña-González, J., Vargas-Zamora, J. A., & Córdoba, R. (2006). A snapshot view of some vertical distributions of water parameters at a deep (200m) station in the fjord like Golfo Dulce, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 54(Suppl. 1), 193-200.
- Acuña-González, J., Vargas-Zamora, J. A., Gómez-Ramírez, E., & García-Céspedes, J. (2004). Hidrocarburos de petróleo, disueltos y dispersos, en cuatro ambientes costeros de Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 52(Suppl. 2), 43-50.
- Alfaro, E., Cortés, J., Alvarado, J., Jiménez, C., Sánchez, C., Nivia, J., ... Ruiz, E. (2012). Clima y variabilidad climática de la temperatura subsuperficial del mar en Bahía Culebra, Golfo de Papagayo, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 60(Suppl. 2), 173-186.
- Amador, J. (2008). The Intra-Americas Seas Low-Level Jet (IALJ): Overview and future research. *Annals of the New York Academy of Science*, 1146, 153-188.
- Benovic, A., Fonda-Umani, S., Malej A., & Specchi, M. (1994). Net zooplankton biomass in the Adriatic sea. *Marine Biology*, 79, 209-18.
- Böttger-Schnack, R. (1994). The microcopepod fauna in the eastern Mediterranean and Arabian Sea: a comparison with the Red sea fauna. *Hydrobiology*, 292/293, 271-282.
- Böttger-Schnack, R. (1995). Summer distribution of micro and small mesoplankton in the Red sea and Gulf of Aden, with special reference to non-calanoïd copepods. *Marine Ecology Progress Series*, 118, 81-102.
- Brenes, C. L. & León, S. (1988). Algunos aspectos fisico-químicos del Golfo Dulce. *Ingeniería y Ciencia Química*, 12(1-2), 16.
- Córdoba, R. & Vargas, J. A. (1996). Temperature, salinity, oxygen and nutrient profiles at a 200m deep station in Golfo Dulce, Pacific coast of Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 44(Suppl. 3), 233-236.
- Dalsgaard, T., Canfield, D. E., Petersen, J., Thamdrup, B., & Acuña-González, J. (2003). N₂ production by the anammox reaction in the anoxic water column of Golfo Dulce, Costa Rica. *Nature*, 422, 606-608.
- Fairbridge, R. W. (1980). The Estuary: Its definition and geodynamic cycle. In E. Olausson & I. Cato (Eds.), *Chemistry and Biogeochemistry of Estuaries* (pp. 1-35). Chichester: Wiley.
- Fallas, J. C. & Oviedo, R. (2003). El clima en Centroamérica. In J. C. Fallas & R. Oviedo (Eds.), *Fenómenos atmosféricos y cambio climático, visión centroamericana* (pp. 70). San José, Costa Rica: Instituto Meteorológico Nacional.
- García-Céspedes, J., Acuña-González, J., & Vargas-Zamora, J. A. (2004). Metales traza en sedimentos de cuatro ambientes costeros de Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 52(Suppl. 2), 51-60.
- García, V., Acuña-González, J., Vargas-Zamora, J. A., & García-Céspedes, J. (2006). Calidad bacteriológica y desechos sólidos en cinco ambientes costeros de Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 54(Suppl. 1), 35-48.
- Harris, R. (1987). Spatial and Temporal organization in marine plankton communities. In J. H. R. Gee & G. S. Geller (Eds.), *Organization of communities: past and present* (pp. 576). USA: Blackwell Science.
- Hartmann, H. & Acevedo-Gutiérrez, A. (1996). *The Golfo Dulce Marine Environment: Review and Assessment* (Technical Manuscript). France: Dep. Biology, University of La Rochelle.
- Hebbeln, D., Beese, D., & Cortés, J. (1996). Morphology and sediment structures in Golfo Dulce, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 44(Suppl. 3), 1-10.
- Herrera, W. (1985). *Clima de Costa Rica*. San José, Costa Rica: EUNED.
- Holton, J. (2004). *An Introduction to Dynamic Meteorology* (4th. ed.). New York, USA: Academic Press.
- Knauss, J. A. (1978). *Introduction to Physical Oceanography*. New York, USA: Prentice-Hall.
- Kuever, J., Wawer, C., & Lilleback, R. (1996). Microbiological observations in the anoxic basin Golfo Dulce, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 44(Suppl. 3), 49-47.
- Lavaniegos, B. & Gonzalez-Navarro, E. (1999). Cambios en la comunidad de copépodos durante el ENSO de 1992-93 en el canal de San Lorenzo, Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 25(2), 239-65.
- León-Morales, R. & Vargas, J. (1998). Macroinfauna of a tropical fjord-like embayment: Golfo Dulce, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 46(6), 81-90.
- Lewis, B. E. (1982). Reseña histórica de la población y los recursos naturales de la Península de Osa, Pacífico Sur, 1848-1981. *Revista Geográfica de América Central*, 17-18, 123-130.

- Lizano, O. G. (2003). *Aspectos oceanográficos en el interior de Bahía Golfito, Golfo Dulce, Puntarenas* (Informe Técnico). No publicado.
- Lizano, O. G. (2006). Algunas características de las mareas en la costa Pacífica y Caribe de Centroamérica. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 24, 51-64.
- Lizano, O. G. (2007). Climatología del viento y el oleaje frente a las costas de Costa Rica. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 25(1-2), 43-56.
- Lizano, O. G. (2013). La dinámica oceanográfica al frente del Humedal Nacional Terraba-Sierpe (HNST) y su relación con la muerte del manglar. *Revista de Biología Tropical*, Vol. 63 (Suplemento 1), 29-46.
- Longhurst, A. (1985). Relationships between diversity and the vertical structure of the upper ocean. *Deep Sea Research*, 32(12), 1535-1570.
- Longhurst, A. & Pauly, D. (Eds.). (1987). Biological Communities of Tropical Oceans. In *Ecology of tropical Oceans* (pp. 63-105). USA: Academic Press, Inc.
- Madhupratap, M., Srekumaran, S. R., Haridas, P., & Padmavati, G. (1990). Response of zooplankton to physical changes in the environment: coastal upwelling along the central west coast of India. *Journal of Coastal Research*, 6, 413-426.
- Magaña, V. O., Amador, J. A., & Medina, S. (1999). The midsummer drought over Mexico and Central America. *Journal of Climatology*, 12, 1577-1588.
- Morales-Ramírez, A. (2011). La diversidad marina del Golfo Dulce, Pacífico Sur de Costa Rica: amenazas a su conservación. *Biocenos*, 24(1-2), 9-20.
- Morales-Ramírez, A. (2013). Un análisis sobre la situación de algunos de nuestros ecosistemas costeros: necesidad de una gestión integrada. *Ambientico*, 230-23, 16-26.
- Morales-Ramírez, A. & Brugnolli, E. (2001). El Niño 1997-1998 impact on the plankton dynamics in the Gulf of Nicoya, pacific coast of Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 49(Suppl. 2), 103 -114.
- Morales-Ramírez, A. & Nowaczyk, J. (2006). Distribución, abundancia, biomasa y composición del zooplancton gelatinoso en Golfo Dulce, costa pacífica de Costa Rica, durante la transición estación lluviosa-seca 1997-1998: posible impacto del fenómeno El Niño. *Revista de Biología Tropical*, 54 (Suppl. 1), 201-223.
- Morales-Ramírez, A. & Jacob, A. (2008). Seasonal vertical distribution, abundance and biometrical relationship of ostracods in Golfo Dulce, pacific coast of Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 56(Suppl. 4), 125-147.
- Muñoz, A., Fernández, W., Gutiérrez, J., & Zárate, E. (2002a). Distribución Horaria de la magnitud del viento en Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 9(1), 14-28.
- Muñoz, A., Fernández, W., Gutiérrez, J., & Zárate, E. (2002b). Variación estacional del viento en Costa Rica y su relación con los regimenes de lluvia. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 9(1), 1-13.
- Omori, M. (1978). Some factors affecting on dry weight, organic weight and concentrations of carbon and nitrogen in freshly preserved zooplankton. *International Review of ges Hydrobiology*, 63(2), 261-69.
- Omori, M. & Fleminger, A. (1976). *Fixation and preservation of various marine taxa: Laboratory methods for processing crustacean zooplankton*. Paris, France: The UNESCO Press.
- Quesada-Alpizar, M. A. & Morales-Ramírez, A. (2004). Comportamiento de las masas de agua en el Golfo Dulce, Costa Rica durante El Niño (1997-1998). *Revista de Biología Tropical*, 52(Suppl.2), 95-103.
- Quesada-Alpizar, M. & Cortés, J. (2006). Los ecosistemas marinos del Pacífico Sur de Costa Rica: estado del conocimiento y perspectivas de manejo. *Revista de Biología Tropical*, 54(Suppl. 1), 101-145.
- Quesada-Alpizar, M. & Morales-Ramírez, A. (2006). Abundancia, composición y distribución vertical del zooplancton no gelatinoso en el Golfo Dulce, costa pacífica de Costa Rica, durante 1997-1998: posible efecto fenómeno de El Niño. *Revista de Biología Tropical*, 54(Suppl. 1), 225-240.
- Quirós, G. E. (1989). *Corrientes residuales en Golfo Dulce* (Informe Técnico). Heredia, Costa Rica, Sección de Oceanografía, Departamento de Física, Universidad Nacional.
- Quirós, G. (2003). Circulación del Golfo Dulce: un fiordo tropical. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 10(2), 75-83.
- Richards, F. A., Anderson, J. J., & Cline, J. D. (1971). Chemical and physical observations in Golfo Dulce, an anoxic basin on the Pacific coast of Costa Rica. *Limnology and Oceanography*, 16, 43-50.
- Richards, F. A., Cline, J. D., Broenkow, W.W., & Atkinson, L. P. (1965). Some consequences of the decomposition of organic matter in Lake Nitinat, an anoxic fjord. *Limnology and Oceanography*, 10, 185-201.
- Saltzman, J. & Wishner, K. F. (1997a). Zooplankton ecology in the eastern tropical Pacific oxygen minimum zone above a sea mount:1. General trend. *Deep Sea Research*, 1(44), 907-930.
- Saltzman, J. & Wishner, K. F. (1997b). Zooplankton ecology in the eastern tropical Pacific oxygen minimum zone above a sea mount: 2. General trend. *Deep Sea Research*, 2(44), 931-954.
- Silva, A. M. & Bonilla, R. (2015). Estructura de la población y distribución de *Anadara tuberculosa* Sowerby (1833) (Mollusca: Bivalvia) en los manglares de Golfito y Playa Blanca de Puerto Jiménez, Golfo Dulce, Costa

- Rica. *Revista de Biología Tropical*, Vol. 63 (Suplemento 1), 287-298.
- Smetacek, V. (1988). Plankton characteristics. In H. Postma & J. J. Zijlstra (Eds.), *Ecosystems of the World 27, Continental Shelves* (pp. 421). Netherlands: Elsevier.
- Smith, T. M., Reynolds, R. W., Peterson, T. C., & Lawrimore, J. (2008). Improvements to NOAA's Historical Merged Land-Ocean Surface Temperature Analysis (1880-2006). *Journal of Climate*, 21, 2283-2296.
- Spongberg, A. L. (2004). PCB contamination in marine sediments from Golfo Dulce, Pacific coast of Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 52(Suppl. 2), 23-32.
- Spongberg, A. L. & Davis, P. (1998). Organochlorinated pesticide contaminants in Golfo Dulce, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 46(Suppl. 6), 111-124.
- Spongberg, A. L., Witter, J. D., Acuña, J., Vargas, J., Muriillo, M., Umaña, G., ... Pérez, G. (2011). Reconnaissance of selected PPCP compounds in Costa Rican surface waters. *Water Research*, 45, 6709-6717.
- Steele, J. H. & Henderson, E.W. (1992). A simple model for plankton patchiness. *Journal of Plankton Research*, 14, 1397-1403.
- Strickland, J. D. H. & Parsons, T. R. (1972). *A practical handbook of seawater analysis*. Bulletin 167 (2nd ed). Ottawa: Fisheries Research Board of Canada.
- Svendsen, H., Rosseland, R., Myking, S., Vargas, J. A., Lizano, O. G., & Alfaro, E. (2000). *A physical-oceanographical study of Golfo Dulce* (Informe Técnico). San José, Costa Rica, CIMAR-UCR.
- Svendsen, H., Rosseland, R., Myking, S., Vargas, J. A., Lizano, O. G. & Alfaro, E. (2006). A physical-oceanographic study of Golfo Dulce, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 54 (Suppl. 1), 147-170.
- Taylor, M. A. & Alfaro, E. J. (2005). Climate of Central America and the Caribbean. In J. E. Oliver (Ed.), *The Encyclopedia of World Climatology* (pp. 183-189). Netherlands: Springer.
- Thamdrup, B., Canfield, D. E., Ferdelman, T. G., Glud, R. N., & Gundersen, J. K. (1996). A biogeochemical survey of the anoxic basin Golfo Dulce, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 44(Suppl. 3), 19-33.
- Umaña, G. 1998. Characterization of some Golfo Dulce drainage basin rivers (Costa Rica). *Revista de Biología Tropical*, 46(Suppl. 6), 125-135.
- von Wangelin, M. & Wolff, M. (1996). Comparative biomass spectra and species composition of the zooplankton communities in Golfo Dulce and Golfo de Nicoya, Pacific coast of Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 44(3), 135-155.
- White, J., Zang, X., Welling, L., Roman, M., & Dam, H. (1995). Latitudinal gradients in zooplankton biomass in the tropical Pacific at 140°W during the JGOFS EqPac study: effects of El Niño. *Deep Sea Research II*, 42(2-3), 715-33.
- Wiafe, G. & Frid, C. L. (1996). Short-term temporal variation in coastal zooplankton communities: the relative importance of physical and biological mechanisms. *Journal Plankton Research*, 18(8), 1485-1501.
- Wolff, M. & Vargas, J. A. (1994). *R.V. Victor Hensen Costa Rica Expedition 1993/1994. Cruise Report*. Bremen, Germany: Center for Tropical Marine Ecology (ZMT).
- Wolff, M., Hartmann, H. J., & Koch, V. (1996). A pilot trophic model for Golfo Dulce, a fjord like tropical embayment, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 44(Suppl. 3), 215-231
- Zárate, E. (1978). *Comportamiento del viento en Costa Rica* (Nota de Investigación No. 2). San José, Costa Rica: Instituto Meteorológico Nacional.