

Características termohalinas de las aguas costeras del Caribe sur de Costa Rica

Thermohaline characteristics of coastal waters in the southern Caribbean of Costa Rica

Carlos Luis Brenes-Rodríguez¹* y Rosario Benavides-Morera¹

RESUMEN

En agosto y noviembre del año 2012, se realizaron dos campañas hidrográficas en la zona costera del Caribe sur de Costa Rica, entre el Puerto de Limón y la Laguna de Gandoca. Se utilizó un CTD (perfilador de conductividad, temperatura y profundidad) en 43 estaciones para determinar la temperatura, salinidad y clorofila-a. Se encontró que las variaciones espaciales y temporales de la temperatura superficial fueron pequeñas, y los valores se ubicaron entre 28.6°C y 30°C. Asimismo, el rango de salinidades superficiales estuvo entre 33.3 y 35.2 UPS, y la distribución espacial de las concentraciones de clorofila-a en las aguas superficiales presentó un valor promedio de 0.64 mg m⁻³, con un valor máximo de 1.1 mg m⁻³ y un mínimo de 0.19 mg m⁻³. El campo vertical de temperatura se caracterizó por mostrar una capa de mezcla cálida (T ~ 29°C) en ambos meses de muestreo, la cual se extendió hasta los 60 m de profundidad en noviembre y menos de 10 m de profundidad en agosto. En ambos meses de muestreo a partir de la estructura vertical de las isothermas, se encontró un movimiento ciclónico (desde la superficie y hasta los 15 m de profundidad) en la región frente a Cahuita, y un movimiento anticiclónico a partir de los 20 m de profundidad en agosto, y 40 m de profundidad en noviembre. Se identificaron las masas de agua presentes en la columna de agua hasta las profundidades muestreadas: ASC, 0-80 m y ASS, > 80 m.

Palabras claves: Masas de agua, Gandoca, Caribe, Costa Rica, hidrografía.

ABSTRACT

In August and November 2012, two hydrographic surveys were conducted in the coastal region of the Southern Caribbean of Costa Rica, between the Port of Limon and Gandoca Lagoon. A CTD (conductivity, temperature and depth profiler) was used at 43 stations to determine temperature, salinity and chlorophyll-*a*. It was determined that spatial and temporary variations of surface temperature were small, with values ranging between 28.6°C and 30°C. In addition, surface salinity ranged between 33.3 and 35.2 PSU and the average spatial distribution of chlorophyll-*a* concentration in surface waters was 0.64 mg m⁻³, with maximum and minimum values of 1.1 mg m⁻³ and 0.19 mg m⁻³, respectively. The vertical temperature field was characterized by a warm mixed layer (T ~ 29°C), which extended to 60 m deep in November and less than 10 m deep in August. During the two sampled months, from the vertical structure of the isotherms, we found a cyclonic motion (from the surface to 15 m deep) in the region adjacent to Cahuita, and an anticyclonic motion at 20 m in August and 40 m in November. We identified water masses present in the water column to the depths sampled: CSW, 0-80 m and SSW, > 80 m.

Keywords: Water masses, Gandoca, the Caribbean, Costa Rica, hydrography.

¹ Laboratorio de Oceanografía y Manejo Costero, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica, Apdo. 86-3000. cbrenes.una@gmail.com*, rbmorera@gmail.com

Recibido: 20 de mayo de 2014

Corregido: 25 de noviembre de 2014

Aceptado: 9 de febrero de 2015

DOI: <http://dx.doi.org/10.15359/revmar.7.2>

INTRODUCCIÓN

Particularmente en las zonas costeras, las propiedades termohalinas de las masas de agua, así como el contenido de nutrientes, son algunas de las variables oceanográficas más utilizadas como indicadores ambientales por su relación con aspectos como corrientes marinas, vientos superficiales, dinámica de la capa de mezcla, precipitación y escorrentías, afloramientos y cambios del nivel del mar. Por otro lado, se relacionan con los ciclos de vida, metabolismo, factores poblacionales, estrés de los organismos y, en general, con toda la variabilidad biológica que conlleva algún tipo de relación con los factores antes mencionados (Bonilla *et al.* 2003). En este contexto, estudiar los cambios espaciales y temporales de dichas variables en el Caribe costarricense, se reviste de importancia desde los puntos de vista tanto físico y climático, como biológico y ambiental.

Las costas orientales de Costa Rica son parte de la porción extrema del Mar Caribe noroccidental. La plataforma continental de estas costas es muy angosta, lo que hace suponer que existe una fuerte influencia oceánica sobre el comportamiento de las aguas costeras, y que muchos procesos que se originan fuera de la plataforma continental tienen su impacto directo sobre algunas propiedades físicas del agua de mar en zonas netamente litorales, en particular aquellos que modulan la circulación y sus procesos productivos.

En general, en los ecosistemas marino-costeros, los flujos de marea,

vientos locales, surgencias y el aporte de agua dulce proveniente de ríos, generan condiciones hidrográficas de mezcla y estratificación de la columna de agua, provocando cambios en el balance de nutrientes y en el estado trófico de estos ecosistemas (Fabricius, 2005). De esta manera, un incremento de los niveles de nutrientes en la columna de agua, se asocia a los procesos de mezcla, mientras que una disminución en dichos niveles en la superficie o su acumulación en el fondo de la columna de agua, se asocia a determinadas condiciones de estratificación.

Las masas de agua del litoral costero experimentan la influencia de contaminantes de origen antropogénico mediante la escorrentía continental (Bonilla *et al.* 1998). La hidrodinámica costera determina y regula el drenaje de material orgánico e inorgánico y en suspensión hacia los ecosistemas litorales. Estos procesos son importantes para su equilibrio ecológico, debido a que controlan los cambios diagenéticos en la columna de agua y sedimentos (Bonilla *et al.* 1995).

En las áreas costeras del litoral Caribe de Costa Rica se ha desarrollado un uso diversificado de sus aguas marinas que involucran la recreación, el saneamiento básico y una creciente actividad industrial y portuaria. En esta zona, que es uno de los principales destinos turísticos del país, dados sus paisajes y la belleza natural de sus playas, también se disponen las aguas residuales de la ciudad de Limón mediante el uso de un emisario submarino (Araya *et al.* 2009). Adicionalmente, posee una gran

importancia ecológica por sus zonas arrecifales (Cortés & León, 2002), no obstante, hasta la fecha han recibido poca atención en cuanto al estudio de sus principales características físicas, y no existen estudios previos sobre la caracterización de las masas de agua en esta zona litoral.

La presente investigación está orientada al estudio de la distribución espacial y vertical en la columna de agua de algunos parámetros hidrográficos en la zona litoral del Caribe costarricense, con la finalidad de contribuir a la caracterización de su actual condición ambiental.

METODOLOGÍA

La región estudiada se ubicó en la zona costera del Caribe sur, entre la ciudad de Limón y el área frente a la Laguna de Gandoca (Fig. 1). De este modo, se muestrearon 43 estaciones distribuidas en nueve transectos perpendiculares a la costa, extendiéndose hasta la isóbata de 120 m. Se realizaron dos campañas hidrográficas: agosto y noviembre del 2012, en concordancia con los extremos del ciclo de precipitación que prevalece en la zona.

Se utilizó un perfilador vertical CTD (por sus iniciales en inglés) modelo SB-19 plus, para la determinación de la temperatura, salinidad y clorofila, y con estos datos se elaboraron gráficos con el programa SURFER 11 (2012). Para analizar las distribuciones verticales de temperatura, salinidad y clorofila-a, se escogieron las estaciones 3, 8, 13,

18, 23, 27, 33, 38 y 41, ubicadas en la parte central de cada uno de los nueve transectos perpendiculares a la costa, con lo cual se construyó un transecto latitudinal (Fig. 1).

Se utilizaron imágenes de satélite para obtener los campos superficiales de temperatura y clorofila-a en la zona de estudio y en las áreas adyacentes, para esto se tuvo en cuenta el GES-DISC Interactive Online Visualization and Analysis Infrastructure, el Goddard Earth Sciences (GES), Data and Information Services Center (DISC), de la NASA (NOAA-NASA, 2013). Asimismo, se realizó un diagrama dispersivo T-S, con el fin de identificar las masas de agua presentes en la columna de agua, hasta una profundidad de 110 metros.

RESULTADOS

La Figura 2 muestra las distribuciones superficiales de temperatura para los meses de muestreo, en esta se observó que las variaciones temporales y espaciales son muy pequeñas, evidenciando un campo térmico muy homogéneo, y los valores se ubicaron entre 28.6°C y 30°C. Sin embargo, en el mes de noviembre las temperaturas fueron ligeramente inferiores a 29°C en los extremos norte y sur del área estudiada. Lo anterior, también fue descrito por autores como Gorshkov (1978), Brenes *et al.* (1998) y Bernal *et al.* (2006), quienes mencionan que el ciclo anual de la temperatura superficial en el Caribe centroamericano y en el extremo norte del Caribe colombiano, se caracteriza por presentar un máximo en los meses de septiembre-noviembre, con

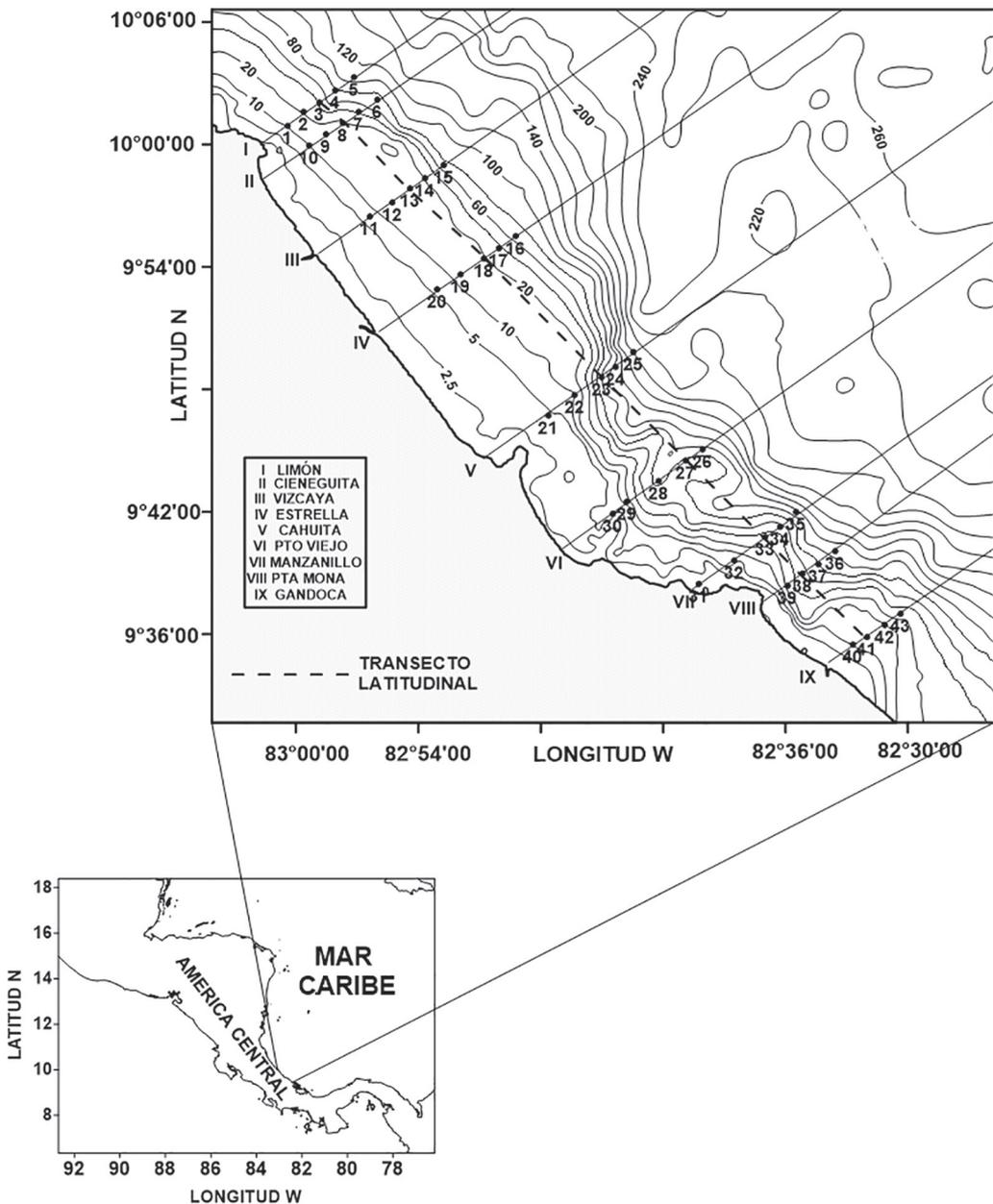


Fig. 1. Estaciones hidrográficas y batimetría del área de estudio (m)
 Fig. 1. Hydrographic stations and bathymetry of the study area (m)

temperaturas superiores a los 29°C, y un mínimo de diciembre a febrero, asociado a la intensificación de los vientos alisios del noreste y a áreas de afloramiento costero (Lonin *et al.* 2010).

Las salinidades superficiales más bajas se observaron en noviembre, con valores inferiores a 35 UPS en toda la región (Fig. 3). De esta manera, los efectos de dilución debi-

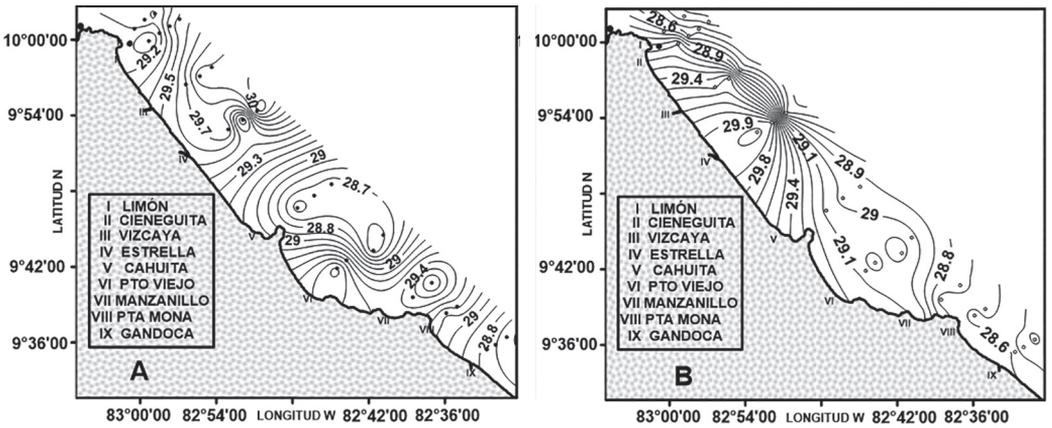


Fig. 2. Distribución de la temperatura (°C) superficial, para los meses de agosto (A) y noviembre (B) del año 2012

Fig. 2. Distribution of surface temperature (°C) for August (A) and November (B), 2012

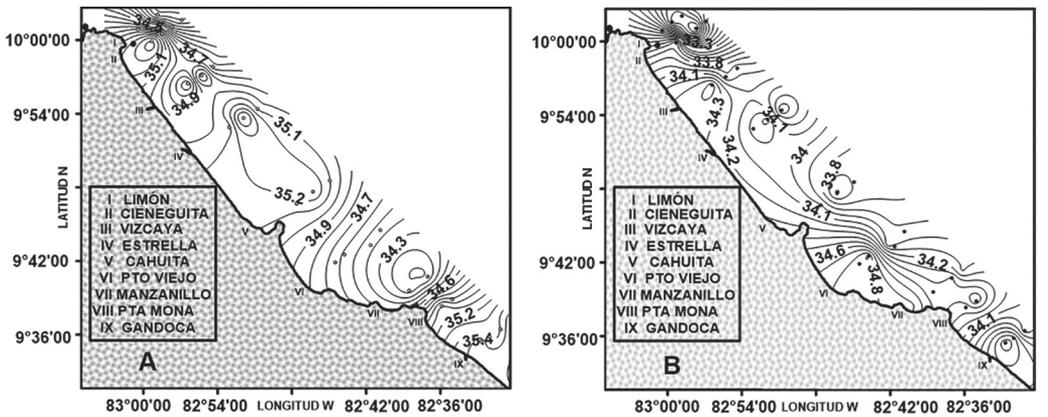


Fig. 3. Distribución de la salinidad (PSU) superficial, para los meses de agosto (A) y noviembre (B) del año 2012

Fig. 3. Distribution of surface salinity (PSU) for August (A) and November (B), 2012

do a los aportes de agua dulce a lo largo de la zona costera del Caribe costarricense regulan el comportamiento del campo salino superficial. Así, las distribuciones salinas son un reflejo del ciclo anual del caudal de los principales ríos que se localizan en la región (Sixaola, Gandoca, Cocles, Carbón, Tuba, Estrella, San Andrés, Bananito, Vizcaya, Banano

y Limoncito), el cual presenta un mínimo entre agosto-septiembre y un máximo entre noviembre-diciembre, en concordancia con el ciclo de precipitación que caracteriza la zona, tal como se evidencia en la Figura 4, donde se muestra el ciclo anual de la precipitación para la estación meteorológica ubicada en el Aeropuerto de Limón (9° 57' 00 N, 83° 01' 00 W).

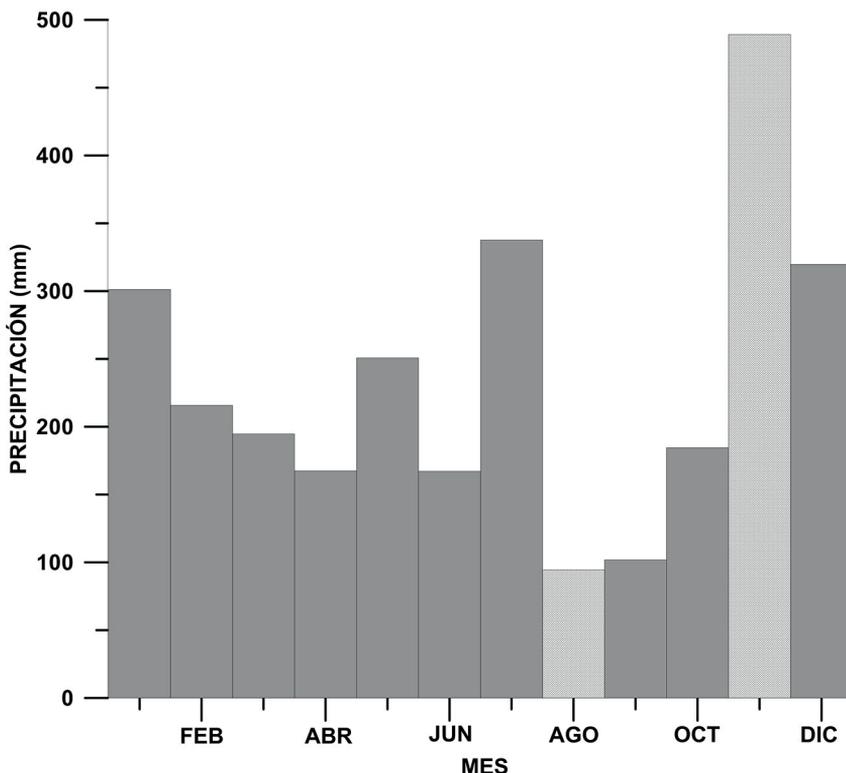


Fig. 4. Ciclo hidrológico multiannual de la precipitación (mm) en la estación meteorológica ubicada en el Aeropuerto de Limón (9°57'00 N, 83°01'00 W). Las barras cuadrículadas corresponden a los meses de muestreo (IMN, 2012)

Fig. 4. Precipitation multiannual hydrological cycle (mm) at the meteorological station located at the Limon airport (9°57'00 N, 83°01'00 W). The cross-hatched bars correspond to the sampled months (IMN, 2012)

Por otro lado, en el mes de noviembre se observaron dos núcleos de bajas salinidades en los extremos del área estudiada ($S < 34.1$ UPS) y, en general, para los meses de muestreo las salinidades superficiales se ubicaron entre 33.3 y 35.2 UPS.

A su vez, una de las variables más importantes para describir la condición biológica promedio en los ecosistemas marinos es la concentración de clorofila-a, la cual es considerada como un indicador

general del fitoplancton. De este modo, en la Figura 5 se muestran los valores superficiales obtenidos para esta variable. La distribución espacial de las concentraciones de clorofila-a en las aguas superficiales de la zona estudiada presentó para ambos meses de muestreo, un valor promedio de 0.64 mg m^{-3} , con un máximo de 1.1 mg m^{-3} y un mínimo de 0.19 mg m^{-3} . En el mes de agosto se observaron condiciones eutróficas ($\text{Chl-a} > 1 \text{ mg m}^{-3}$) en el área ubicada frente al estero

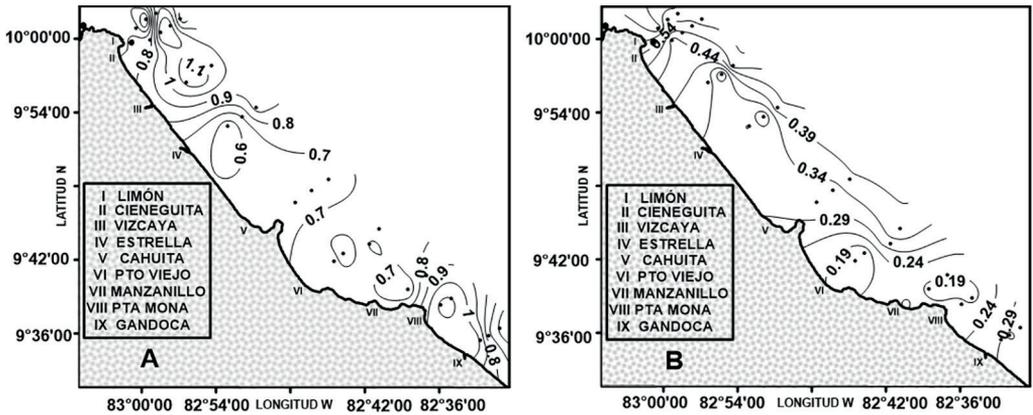


Fig. 5. Distribución de la clorofila-a (mg m^{-3}) superficial, para los meses de agosto (A) y noviembre (B) del año 2012

Fig. 5. Surface chlorophyll-a distribution (mg m^{-3}) for August (A) and November (B), 2012

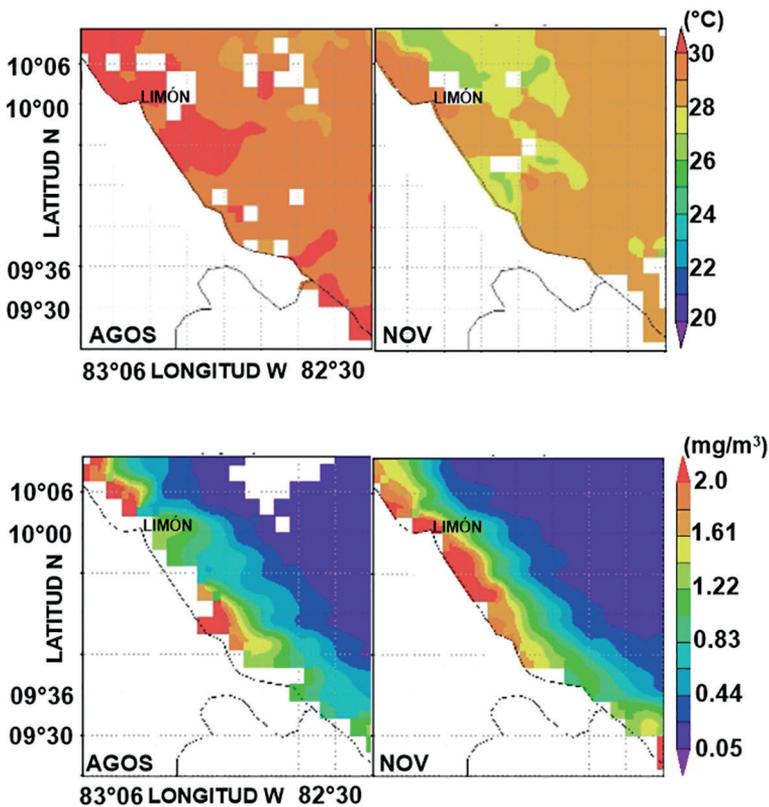


Fig. 6. Promedios mensuales de temperatura ($^{\circ}\text{C}$, parte superior) y concentración de clorofila-a (mg m^{-3} , parte inferior) superficiales, para los meses de agosto y noviembre del año 2012

Fig. 6. Average monthly surface temperature ($^{\circ}\text{C}$) and chlorophyll-a (mg m^{-3}) for August and November 2012

de Vizcaya y a la Laguna de Gandoca, mientras que para el resto de la región, incluyendo el mes de noviembre, las condiciones predominantes fueron mesotróficas ($0.2 < \text{Chl-a} < 1 \text{ mg m}^{-3}$).

La Figura 6 muestra los promedios mensuales de la temperatura superficial ($^{\circ}\text{C}$) y de la concentración de clorofila-a (mg m^{-3}), obtenidos a partir de datos de satélite (MODIS-Aqua, resolución espacial de $4 \times 4 \text{ km}$). Los resultados logrados en el presente trabajo coincidieron bastante bien con lo observado desde el espacio. Las mayores discrepancias se contemplaron en las imágenes de clorofila-a, en las cuales la presencia de nubes cerca de la línea de costa impidió tener un panorama más claro. Así, las mayores concentraciones se presentaron durante el mes de noviembre, asociadas probablemente al aporte de nutrientes a la zona debido a la escorrentía superficial. A su vez, lo anterior pudo influir en las temperaturas superficiales,

las cuales son ligeramente más altas en agosto que en noviembre.

Para analizar las distribuciones verticales de temperatura, salinidad y clorofila-a, se escogieron las estaciones 3, 8, 13, 18, 23, 27, 33, 38 y 41, ubicadas en la parte central de cada uno de los nueve transectos perpendiculares a la costa. El campo vertical de temperatura (Fig. 7) se caracterizó por mostrar en ambos meses de muestreo, una capa de mezcla cálida ($T \sim 29^{\circ}\text{C}$), la cual se extendió hasta los 60 m de profundidad en el mes de noviembre y menos de 10 m de profundidad en el mes de agosto. Los gradientes verticales de esta variable fueron muy pequeños, y nunca superaron los $5 \times 10^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C m}^{-1}$. Entre los transectos V (Cahuita) y VI (Puerto Viejo) donde se localizan las estaciones 23 y 27, respectivamente, la batimetría del área mostró una depresión pronunciada cercana a la costa (Fig. 1), y las isotermas en los primeros 10 m presentaron

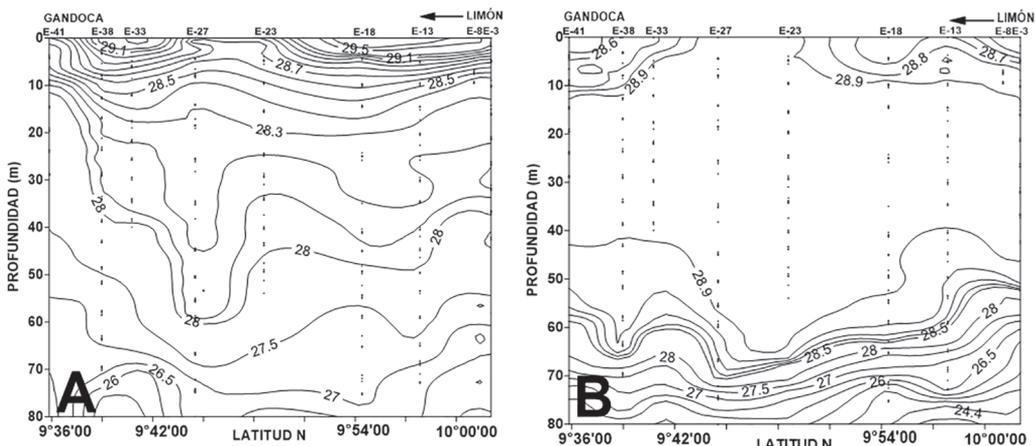


Fig. 7. Distribución vertical de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para un transecto latitudinal a lo largo del área de estudio, para los meses de agosto (A) y noviembre (B) del año 2012
 Fig. 7. Vertical distribution of temperature ($^{\circ}\text{C}$) for a latitudinal transect along the study area for August (A) and November (B), 2012

una inclinación ascendente hacia la superficie del mar. Sin embargo, en los estratos más profundos, por debajo de los 40 m (noviembre) y los 20 m (agosto) el comportamiento es inverso.

El campo vertical salino se muestra en la Figura 8. Se encontró que los

estratos superficiales por encima de la isóbata de 20 m de profundidad, presentan gradientes verticales muy bien definidos ($\Delta S/\Delta Z = 0.1 \text{ UPS m}^{-1}$). Los valores más bajos ($S < 34 \text{ UPS}$) se observaron en el mes de noviembre, debido a que en dicho mes la actividad lluvio-

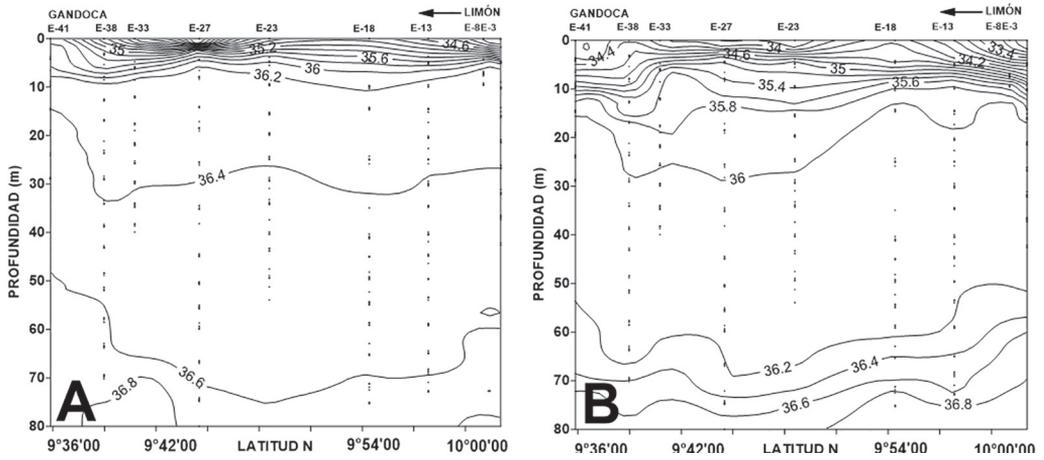


Fig. 8. Distribución vertical de la salinidad (UPS) para un transecto latitudinal a lo largo del área de estudio, para los meses de agosto (A) y noviembre (B) del año 2012

Fig. 8. Vertical distribution of salinity (PSU) for a latitudinal transect along the study area for August (A) and November (B), 2012

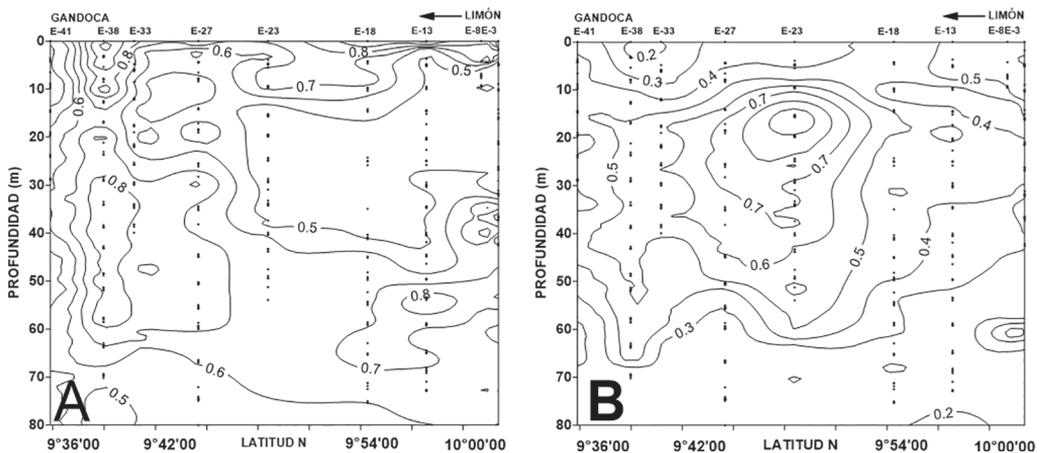


Fig. 9. Distribución vertical de la clorofila-a (mg m^{-3}) para un transecto latitudinal a lo largo del área de estudio, para los meses de agosto (A) y noviembre (B) del año 2012

Fig. 9. Vertical distribution of chlorophyll-a (mg m^{-3}) for a latitudinal transect along the study area for August (A) and November (B), 2012

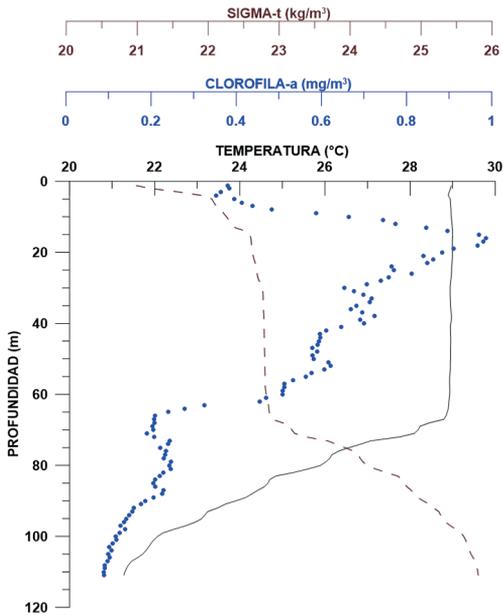


Fig. 10. Perfiles verticales de temperatura (°C), clorofila-a (mg m^{-3}) y sigma-t (kg m^{-3}) para la estación 23, durante el mes de noviembre del año 2012

Fig. 10. Vertical profiles of temperature (°C), chlorophyll-a (mg m^{-3}) and sigma-t (kg m^{-3}) for station 23 during November 2012

sa fue muy intensa (500 mm, Fig. 4). Las isohalinas mostraron, al igual que las isotermas, una inclinación ascendente en la región comprendida entre Cahuita y Puerto Viejo (estaciones 23 y 27), mientras que en los estratos más profundos se observó lo contrario.

En la Figura 9 se presentan las distribuciones verticales de clorofila-a. Esta variable se ubicó entre los 0.3 mg m^{-3} y 1 mg m^{-3} . En el mes de agosto en el extremo sureste del transecto, entre Manzanillo (VII) y Gandoca (IX), se observaron altas concentraciones de clorofila ($\sim 0.8 \text{ mg m}^{-3}$) en toda la columna de agua. Sin embargo, en el mes de noviembre el máximo de clorofila-a anterior, se localizó

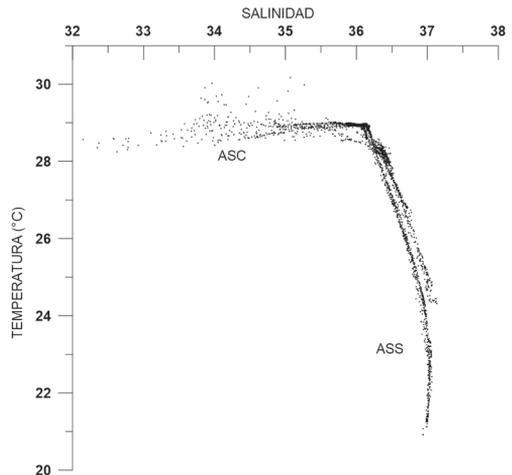


Fig. 11. Diagrama T-S dispersivo para todas las estaciones muestreadas en los meses de agosto y noviembre del año 2012 Fig. 11. Dispersion T-S diagram for all stations sampled in the months of August and November 2012

zó en la parte central del transecto alrededor de la estación 23 (Fig. 9B), así, la concentración de clorofila-a en esta estación varió entre 0.39 mg m^{-3} en la superficie, y concentraciones máximas de 0.8 a 1.0 mg m^{-3} , localizadas entre los 15 m y 30 m de profundidad, respectivamente, todo dentro de la gruesa capa de mezcla (cálida y poco densa). Mientras que, a medida que se profundizaba en el perfil, las concentraciones de clorofila-a fueron disminuyendo, así en esta zona se presentaron los valores más bajos de esta (Fig. 10).

El diagrama dispersivo T-S (Fig. 11) permitió identificar las masas de agua presentes en la columna de agua hasta una profundidad de 120 m. Así, se encontraron dos masas de agua, correspondientes al Agua Superficial del Caribe (ASC, 0-80 m) y al Agua Subsuperficial Subtropical (ASS, > 80 m) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Índices termohalinos de las masas de agua
Table 1. Thermohaline indexes of water masses

Masas de agua	T (°C)	S (PSU)	Referencias
ASC	28-30	34.5-36	Morrison & Nowlin (1982), Tomczak & Godfrey (1994), Mooers & Maul (1998), Andrade & Barton (2000), Hernández-Guerra & Joyce (2000).
ASS	21-23	36.6-37	Morrison & Nowlin (1982), Mooers & Maul (1998), Andrade & Barton (2000), Hernández-Guerra & Joyce (2000).

DISCUSIÓN

La zona noroccidental del Caribe presenta un clima de carácter tropical, con valores altos de radiación total incidente y altas temperaturas de sus aguas superficiales ($>27^{\circ}\text{C}$) durante la mayor parte del año (Gray, 1993; Ruiz-Ochoa, 2011). Como fue comentado en el apartado anterior, la zona de estudio está bajo la influencia de varios ríos, cuyas descargas tienen un impacto directo sobre su estructura hidrográfica. El otro factor que modula el comportamiento de los índices termohalinos está relacionado con la influencia de las aguas oceánicas adyacentes, debido a lo estrecho de la plataforma continental en esta área del Mar Caribe. Estos dos factores moduladores pueden ser fácilmente identificados en el comportamiento de los resultados obtenidos en el presente trabajo.

Los muestreos se realizaron en los extremos del ciclo anual de lluvias, con agosto como el mes menos lluvioso y noviembre el de mayores precipitaciones (Fig. 4). Las bajas salinidades superficiales observadas en el mes de noviembre ($S < 34.0$ UPS) pueden estar relacionadas con un

patrón más lluvioso en ese período con respecto al mes de agosto (Fig. 3A). Las diferencias entre ambos meses son del orden de 1 UPS. En la región costera entre el Puerto de Limón y Cieneguita, transectos I y II, respectivamente, se observó para ambos meses un frente salino muy bien definido, es probable que esté asociado a la interacción de aguas de origen marino con aguas residuales provenientes de descargas continentales en esa zona.

La estructura vertical del campo salino también refleja la influencia de las descargas fluviales de la zona. La capa superficial durante los muestreos fue la que presentó la mayor estratificación, y el hundimiento de la isohalina de 36 UPS hasta los 30 m de profundidad en el mes de noviembre y menos de 10 m en el mes de agosto, tal como se evidencia en la Figura 8B, donde se pueden observar los fuertes procesos de dilución que experimentan los estratos superiores por escorrentía y precipitación. Contrario a lo que ocurre por debajo de los 60 m de profundidad, donde no se observaron cambios significativos en los contenidos de sal en la columna de agua.

Los campos térmicos superficiales no mostraron diferencias importantes, debido a que ambos muestreos se

realizaron en el período de mayores temperaturas dentro del ciclo anual de esta variable, y el rango encontrado ($28.6^{\circ}\text{C} < T < 30^{\circ}\text{C}$) está en concordancia con trabajos realizados previamente a escala regional (Levitus & Boyer, 1994; Ruiz-Ochoa, 2011).

Ruiz-Ochoa (2011) encontró que las máximas temperaturas observadas en el último trimestre del año en el Golfo de Darién y el Golfo de los Mosquitos se podían explicar con base en las importantes descargas de ríos en la región sur de la Cuenca Colombia, cuya descarga es máxima de agosto a noviembre, lo que produce un agua de muy baja densidad superficial que propicia la generación de una termohalina superficial que inhibe la mezcla vertical y, por lo tanto, la absorción de radiación solar se presenta en una capa muy delgada.

La distribución vertical de temperaturas presenta una estratificación definida en el mes de agosto limitada a los primeros 10 m de profundidad, mientras que el mes de noviembre se caracterizó por la presencia de una capa isotérmica en todo el transecto, con temperaturas cercanas a los 29°C (Fig. 6). En ambos meses, fue evidente la inclinación de las isotermas hacia la superficie del mar entre las estaciones 23 y 27, lo cual se podría asociar con un movimiento ciclónico de las aguas en la columna, exactamente en la región donde se localiza la depresión batimétrica frente a Cahuita (transecto V). Esta característica del suelo marino facilita el intercambio de masas de agua entre

la zona oceánica adyacente (más frías y más saladas) desde los estratos más profundos, y la zona costera (más cálidas y menos salinas) en los niveles superiores, de tal manera que las diferencias de densidad entre ambos estratos propician la presencia de patrones de circulación diferentes. En los dos períodos de muestreo, en el estrato superior (hasta los 15 m de profundidad) se pudo apreciar la circulación ciclónica centrada en la zona ubicada entre Cahuita (transecto V) y Puerto Viejo (transecto VI). Este patrón es contrario a la circulación anticiclónica que se puede observar a partir de los 40 m (noviembre) o de los 20 m (agosto) de profundidad, donde las isotermas muestran una inclinación descendente en esa misma región.

Con respecto a las distribuciones superficiales de clorofila-a, durante los dos meses de muestreo se observaron los máximos valores en el extremo noroeste de la zona de estudio, entre Vizcaya y el Puerto de Limón (entre 1.1 mg m^{-3} y 0.54 mg m^{-3}). Esto se puede deber al aporte de nutrientes inorgánicos, a través de posibles procesos de fertilización relacionados con aportes continentales, como se ha descrito en algunas zonas costeras cercanas a la desembocadura de ríos o escorrentías urbanas de poblaciones, donde la abundancia de nutrientes llega a ser de un orden de magnitud más alta que en las aguas circundantes (Marchetti *et al.* 1989; Justic *et al.* 1995; Rabalais *et al.* 1996; Olivos *et al.* 2002; Restrepo *et al.* 2006). Esta suposición se ve reforzada con la imagen de satélite para

el mes de noviembre, la cual mostró concentraciones importantes de clorofila justo al sur de la ciudad de Limón (Fig. 6). De modo general, los rangos de variación encontrados para esta variable en la superficie pueden asociarse también a una alta productividad primaria (López-Sandoval *et al.* 2009).

Las concentraciones promedio de la clorofila integrada en la columna de agua para la estación 23 (transecto V), localizada en el centro del transecto longitudinal fue de 50 mg m^{-3} en noviembre y 16.4 mg m^{-3} en agosto, menos de un tercio con respecto a noviembre. Las altas concentraciones ocurrieron cuando la columna era menos estratificada térmicamente, y los estratos superiores estuvieron ocupados por aguas menos salinas.

Las imágenes de clorofila-a superficial obtenidas por satélite (Fig. 6) muestran que las concentraciones en las aguas oceánicas adyacentes al área de estudio son prácticamente despreciables, por lo que el patrón local de escorrentías (en concordancia con el ciclo de precipitaciones) puede ser el principal mecanismo de fertilización de la región estudiada, influyendo en la disponibilidad de nutrientes y, por ende, en la biomasa fitoplanctónica expresada en forma de clorofila-a.

Finalmente, el análisis de las masas de agua mostró que el ASC se caracterizó por bajas salinidades (34.5-36 UPS) y altas temperaturas (28-30°C), mientras que el ASS contiene el máximo subsuperficial de salinidad (36.6-37 UPS) y temperaturas más bajas (21-23°C). Esta última masa de agua proviene de las aguas superficiales del

Atlántico Subtropical Central (Mooers & Maul, 1998), donde la evaporación excede a la precipitación (Gallegos & Czitrom, 1997), e ingresa al Caribe por el noreste de las Antillas Menores. De igual manera, en el Cuadro 1, se presentan los índices termohalinos de dichas masas de agua. Los valores de salinidad están fuera del rango del ASC (Fig. 11), y corresponden a aguas costeras bajo los efectos de dilución por descarga de ríos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Universidad Nacional de Costa Rica, a través de los proyectos Biodiversidad Marina y Costera en el Caribe de Costa Rica: Contribución a la Gestión Ambiental para la Adaptación al Cambio Climático, y el Servicio Regional de Información Oceanográfica (SERIO).

BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, C. & Barton, E. (2000). Eddy development and motion in the Caribbean Sea. *J. Geophys. Res.*, 115(C11), 26191-26201. <http://dx.doi.org/10.1029/2000JC000300>
- Araya, A., Barboza, R., Ramírez, W. & Rodríguez, A. (2009). *Informe Técnico Inspección Tramo Final del Emisario Submarino de Limón*. San José, Costa Rica: Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados.
- Bernal, G., Poveda, G., Roldán, P. & Andrade, C. (2006). Patrones de variabilidad de las temperaturas superficiales del mar en la costa Caribe colombiana. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, XXX(115), 195-208.
- Bonilla, R. J., Fermín, J., Gamboa, B. & Cabrera, M. (1995). Aspectos geoquímicos de los sedimentos superficiales

- del ecosistema marino costero de José, Edo. Anzoátegui. Venezuela. *Bol. Inst. Oceanogr. Univ. Oriente*, 32(1-2), 5-23.
- Bonilla, R. J., Quintero, A., Álvarez, M., De Grado, A., Gil, H., Guevara, M., Martínez, G. & Saint, S. (1998). Condición ambiental de la Ensenada Grande del Obispo, Estado Sucre, Venezuela. *Scientia*, 13(1), 35-59.
- Bonilla, J., Quintero, A., Cordero, J., Basoa, E., Marín, B. & Figueroa, Y. (2003). Condiciones hidrográficas y químicas en la columna de agua de las adyacencias de la cuenca de Cariaco, Estado Sucre, Venezuela. *Saber, Universidad de Oriente, Venezuela*, 15(1-2), 106-112.
- Brenes, C. L., Gallegos, A. & Coen, E. (1998). Variación anual de la temperatura superficial en el Golfo de Honduras. *Rev. Biol. Trop.*, 46(4), 187-197.
- Cortés, J. & León, A. (2002). *Arrecifes coralinos del Caribe de Costa Rica*. Santo Domingo, Costa Rica: Editorial INBIO.
- Fabricius, K. E. (2005). Effects of terrestrial runoff on the ecology of corals and coral reefs: review and synthesis. *Mar. Pollut. Bull.*, 50, 125-146.
- Gallegos, A. & Czitrom, S. (1997). Aspectos de la oceanografía física regional del mar Caribe. En M. Lavin (Ed.), *Contribuciones a la oceanografía física en México* (pp. 225-242). Monografía No. 3. Ensenada, B.C., México: Unión Geofísica Mexicana.
- Gorshkov, S. (1978). *World Atlas, Vol. 2: Atlantic and Indian Oceans*. New York, EE. UU.: Pergamon Press.
- Gray, C. R. (1993). Regional Meteorology and Hurricanes. In G. A. Maul (Ed.), *Climatic Change in the Intra-Americas Sea* (pp. 87-99). London, United Kingdom: Eduard Arnold.
- Hernández-Guerra, A. & Joyce, T. M. (2000). Water masses and circulation in the surface layers of the Caribbean at 66°W. *Geophys. Res. Lett.*, 27(21), 3497-3500.
- IMN. Instituto Meteorológico Nacional. (2012). Recuperado en agosto 9, 2012, disponible en <http://www.imn.ac.cr/>
- Justic, D., Rabalais, N. N., Turner, R. E. & Dortch, Q. (1995). Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: Stoichiometric nutrient balance and its consequences. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 40(3), 339-356.
- Levitus, S. & Boyer, T. (1994). *World Ocean Atlas 1994. Vol. 4: Temperature*. Washington, D.C., EE. UU.: Government Printing Office.
- Lonin, S. A., Hernández, J. L. & Palacios, D. M. (2010). Atmospheric events disrupting coastal upwelling in the southwestern Caribbean. *J. Geophys. Res.*, 115, C06030, doi:10.1029/2008JC005100
- López-Sandoval, D. C., Lara-Lara, J. R., Lavin, M. F. & Gaxiola-Castro, G. (2009). Primary productivity in the eastern tropical Pacific off Cabo Corrientes, México. *Cienc. Mar.*, 35(2), 169-182.
- Marchetti, R., Provini, A. & Crosa, G. (1989). Nutrient load carried by the River Po into the Adriatic Sea, 1968-1987. *Mar. Poll. Bull.*, 20, 168-172.
- Mooers, C. & Maul, G. (1998). Intra-Americas Sea circulation. In H. Brink & A. Robinson (Eds.), *The Sea: The Global Coastal Ocean* (pp. 183-208). New Jersey, EE. UU.: Wiley & Sons, Inc.
- Morrison, J. M. & Nowlin Jr., W. D. (1982). General distribution of water masses within the Eastern Caribbean Sea during the winter of 1972 and fall

- of 1973. *J. Geophys. Res.*, 87(C6), 4207-4229.
- NOAA-NASA. (2013). GOES Project Science. Recuperado en septiembre 19, 2013, disponible en <http://rsd.gsfc.nasa.gov/goes/>
- Olivos, A., Quijano, S. I., García, G., Galicia, M. A. & Gaviño, J. H. (2002). Influencia de los parámetros fisicoquímicos en la distribución de los principales grupos fitoplanctónicos en las costas del Estado de Colima durante el 2002. *Ciencia en la frontera: revista de ciencia y tecnología de la UACJ*, 3(1), 13-28.
- Rabalais, N. N., Turner, R. E., Justic D., Dortch, Q., Wiseman, W. J. & Gupta, B. K. S. (1996). Nutrient changes in the Mississippi River and system responses on the adjacent shelf. *Estuaries*, 19(2), 386-407.
- Restrepo, J., Zapata, P., Díaz, J., Garzón-Ferreira, J. & García, C. (2006). Fluvial fluxes into the Caribbean Sea and their impact on coastal ecosystems: The Magdalena River, Colombia. *Global Planet Change*, 50, 33-49. doi:10.1016/j.gloplacha.2005.09.002
- Ruiz-Ochoa, M. A. (2011). *Variabilidad de la Cuenca Colombia (mar Caribe) asociada con El Niño-Oscilación del Sur, vientos alisios y procesos locales*. Tesis de doctorado no publicada, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
- SURFER 11. (2012). Surfer® Contouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Engineers, version 11 www.GoldenSoftware.com. Colorado, EE. UU.: Golden Software, Inc.
- Tomczak, M. & Godfrey, J. (1994). *Regional Oceanography: An introduction*. Oxford, Reino Unido: Pergamon.