

## Artículo

# Cambios espaciales y estacionales en la hidrografía y biogeoquímica de la región de la Fosa de Cariaco

Laura Lorenzoni, Ramón Varela, Digna Rueda, Frank Muller-Karger, Jaimie Rojas, Laurencia Guzmán, Yrene Astor y Enrique Montes

**Resumen.** La Fosa de Cariaco en la plataforma continental de Venezuela está compuesta por dos sub-cuencas de ~1400 m de profundidad, alineadas de este a oeste. En la cuenca oriental se lleva la serie de tiempo CARIACO (1995 –) con mediciones mensuales hidrográficas, biogeoquímicas y ecológicas. Sin embargo, se conoce menos de la cuenca occidental. Se realizaron dos cruces oceanográficos (FOSA 1 y FOSA 2) en septiembre 2008 (época de estabilidad y lluvia) y marzo 2009 (época de afloramiento y sequía), para analizar la variación espacial y estacional de la hidrografía de ambas sub-cuencas. La temperatura superficial del mar fue uniforme y cálida (28–29 °C) en ambas cuencas en septiembre, y disminuyó en marzo, cuando la cuenca oriental fue significativamente ( $p < 0,05$ ) más fría que la occidental (22–24 °C y 24–26 °C), debido a la surgencia estacional en el sector sureste de la Fosa. La salinidad superficial fue menor en septiembre por la influencia de las aguas superficiales del Caribe y la descarga de ríos locales. En marzo, el nivel del agua Subtropical alcanzó la superficie, elevando los valores de salinidad en toda la región. Los cambios hidrográficos estacionales que experimenta la Fosa influyeron en la concentración de nitrato y clorofila *a* (Chl $a$ ) superficial, ambas bajas en septiembre ( $< 0,1 \mu\text{M}$  y  $< 0,3 \mu\text{g L}^{-1}$ , respectivamente), y más elevados en marzo, en particular en el área de influencia de la surgencia ( $> 2 \mu\text{M}$  y  $> 1,4 \mu\text{g L}^{-1}$ ). El máximo en profundidad de la Chl $a$  también afloró durante la época de surgencia, de 50–60 m en septiembre a 0–40 m en marzo. Se muestra una diferencia significativa entre las cuencas oriental y occidental según la época sea de estabilidad o surgencia. La cuenca occidental presenta una variación estacionalidad menos pronunciada.

**Palabras clave.** Hidrografía. Clorofila. Fosa de Cariaco. Estacionalidad. Mar Caribe, Venezuela.

Spatial and seasonal hydrographic and biogeochemical changes in the region of the Cariaco Basin

**Abstract.** The Cariaco Basin is a semi-enclosed basin of tectonic origin composed of two ~1400 m deep sub-basins, aligned in an east-west direction. In the eastern sub-basin, the CARIACO Ocean Time-Series project has been taking biogeochemical and ecological measurements on a regular basis since 1995. However, relatively little is known about the western sub-basin. Two oceanographic cruises (FOSA FOSA 1 and 2) in September 2008 (stratified water column; rainy season) and March 2009 (upwelling; dry season), were conducted to analyze the spatial and seasonal variation in hydrography and geochemistry of both sub-basins. During September 2008, sea surface temperature (SST) was relatively uniform throughout the basin (28–29 °C), and decreased in March 2009, becoming significantly colder in the eastern than in the western sub-basin (22–24 and 25–26 °C, respectively;  $p < 0.05$ ), due to the seasonal upwelling which occurs in the southeastern part of the basin. Surface salinity was lower in September, due to the influence of surface waters from the Caribbean and the discharge of local rivers. In March, Subtropical Underwater (SUW) reached the surface, raising the salinity values throughout the region. The seasonal hydrographic changes that the basin experiences influenced the surface nitrate and chlorophyll concentrations, both low in September ( $< 0.1 \mu\text{M}$  and

< 0.3  $\mu\text{g L}^{-1}$ , respectively), and higher in March, especially in the area of upwelling (> 2  $\mu\text{M}$  and > 1.4  $\mu\text{g L}^{-1}$ , respectively). The deep chlorophyll maximum also shallowed during the upwelling period, from 50 to 60 m in September to 0–40 m in March. These results show that while the eastern sub-basin responds to the seasonal variability of the region, the western sub-basin has a less pronounced seasonality.

**Key words.** Hidrografía. Chlorophyll. Cariaco Basin. Seasonality. Caribbean Sea. Venezuela.

## Introducción

La Fosa de Cariaco se encuentra al sureste del mar Caribe, en la plataforma continental de Venezuela. Es una depresión de origen tectónico que está formada por dos sub-cuencas, una oriental y otra occidental a lo largo de su eje mayor de 200 km; cada sub-cuenca tiene alrededor de 1400 m de profundidad y las separa una silla menos profunda de ~ 900 m. La Fosa está separada del mar Caribe por un umbral que tiene mayormente menos de 100 m de profundidad, cortado por dos pasos, cada uno de ~ 140 m, ubicados al noroeste cerca del farallón Centinela y al norte entre las islas La Tortuga y Margarita (Figura 1). Las aguas superficiales que se encuentran por encima de este umbral están en intercambio continuo con el mar Caribe. Esta restricción geomorfológica únicamente permite entrar a la Fosa el agua de la superficie del Caribe (*Caribbean Surface Water*, *CSW*, que se encuentra hasta una profundidad de ~ 100 m), la Subtropical inferior (*Subtropical Under Water*, *SUW*, ubicada entre los 100–250 m en el Caribe) y, de forma intermitente, agua por debajo de la Subtropical (de los Sargassos de 18 °C, entre 200–400 m en el Caribe) (Richards y Vaccaro 1956, Okuda *et al.* 1969, Morrison y Nowlin 1982). Esto induce marcadas diferencias en la distribución vertical de las propiedades hidrográficas entre Cariaco y las aguas del Caribe por debajo de la profundidad del umbral (~ 140 m), y limita el transporte horizontal de partículas dentro de la Fosa, que por tanto, actúa como una trampa de sedimento natural dentro de la plataforma continental (Thunell *et al.* 2000, Muller-Karger *et al.* 2001). Hacia el sur, la Fosa está confinada por el territorio continental de Venezuela, donde recibe la influencia de varios ríos locales (Figura 1).

Las condiciones hidrográficas en el Atlántico Tropical y la región de la Fosa de Cariaco están reguladas por el cambio en la posición meridional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la cual induce una marcada estacionalidad en la parte norte del continente suramericano (Muller-Karger *et al.* 1988, Peterson y Haug 2006). Durante los primeros meses del año, mientras la ZCIT se encuentra en su posición más al sur, los vientos alisios son más intensos y promueven la surgencia costera en varios sitios del sur del mar Caribe (Muller-Karger y Aparicio-Castro 1994, Castellanos *et al.* 2002, Rueda-Roa y Muller-Karger 2013). Esta temporada termina alrededor de mayo, cuando la ZCIT se desplaza hacia el norte, lo cual marca también el inicio de la temporada de lluvias en el norte de América del Sur (Peterson y Haug 2006, Restrepo 2008).

La Serie de Tiempo CARIACO fue establecida en 1995 en la cuenca oriental de la Fosa de Cariaco para estudiar procesos hidrológicos, biogeoquímicos y ecológicos en este margen continental. El objetivo es entender la conexión entre la producción primaria que ocurre en la superficie, el material terrígeno que llega de la costa y el flujo de partículas hasta el fondo de la Fosa, donde se produce y conserva un importante registro paleo-climático (Peterson *et al.* 1991). Aunque mediante este proyecto se ha logrado una caracterización exhaustiva de la biogeoquímica y la hidrografía de la cuenca oriental (por ejemplo, Muller-Karger *et al.* 2001, 2004, 2010, Astor *et al.* 2003, Thunell *et al.* 2007, Scranton *et al.* 2014), la cuenca occidental ha sido menos estudiada (por ejemplo Reeburgh 1976, García *et al.* 1983, Ferraz-Reyes 1983, Scranton *et al.* 1987) y la Fosa de Cariaco ha sido examinada en su totalidad y de forma sinóptica en pocas oportunidades (Okuda y Benítez 1974, Febres-Ortega y Herrera 1975). En el presente aporte se explora la dinámica de algunas variables hidrográficas y biogeoquímicas abarcando toda el área de la Fosa de Cariaco en superficie y hasta los 400 m de profundidad durante la temporada de estabilidad (de lluvias), y el periodo de afloramiento (sequía) de 2008 y 2009 respectivamente. Además, se analiza cómo cada sub-cuenca responde a las variaciones estacionales.

## Materiales y métodos

### Datos de campo

Se llevaron a cabo los cruceros oceanográficos FOSA 1 y FOSA 2, del 1 al 5 de septiembre de 2008 y del 9 al 13 de marzo de 2009, ambos a bordo del B/O Hermano Ginés, de la Fundación La Salle de Ciencias Naturales. Septiembre y marzo corresponden con meses centrales de la temporada de estabilidad y de surgencia, respectivamente. La ubicación de las estaciones fue idéntica en ambos cruceros (Figura 1). En cada estación se obtuvieron perfiles (entre 1–400 m) de salinidad, temperatura y fluorescencia, mediante sensores acoplados a un CTD Seabird SBE25. Se utilizó una roseta con 12 botellas Niskin de 8 litros para captar muestras discretas de agua en cada estación; en este trabajo se utilizan solo las mediciones a 1 m para los nutrientes. La concentración de clorofila *a* (*Chla*) se obtuvo a 1 m y en el máximo en profundidad (*Chla<sub>max</sub>*); ambos valores fueron empleados en la calibración de la fluorescencia obtenida con un fluorómetro sumergible (WetLab) para así obtener perfiles calibrados en términos de equivalentes de clorofila. El agua para los nutrientes fue filtrada con filtros de membrana de 0,8  $\mu\text{m}$  (Nuclepore); el filtrado se recolectó directamente en botellas de polietileno de alta densidad de 30 mL, y fue congelado hasta su posterior análisis. Para la *Chla* se filtraron 500 mL de agua de mar a través de filtros GF/F de 25 mm que se mantuvieron congelados hasta su análisis.

Los nutrientes inorgánicos fueron analizados en el Laboratorio de Nutrientes Oceánicos de la Universidad del Sur de la Florida. El nitrógeno inorgánico disuelto (DIN), el fósforo reactivo disuelto (SRP) y el ácido silícico se analizaron usando un autoanalizador Technicon II, siguiendo las técnicas estándar descritas por Strickland y Parsons (1972), modificadas por Gordon *et al.* (1993). La precisión de estas

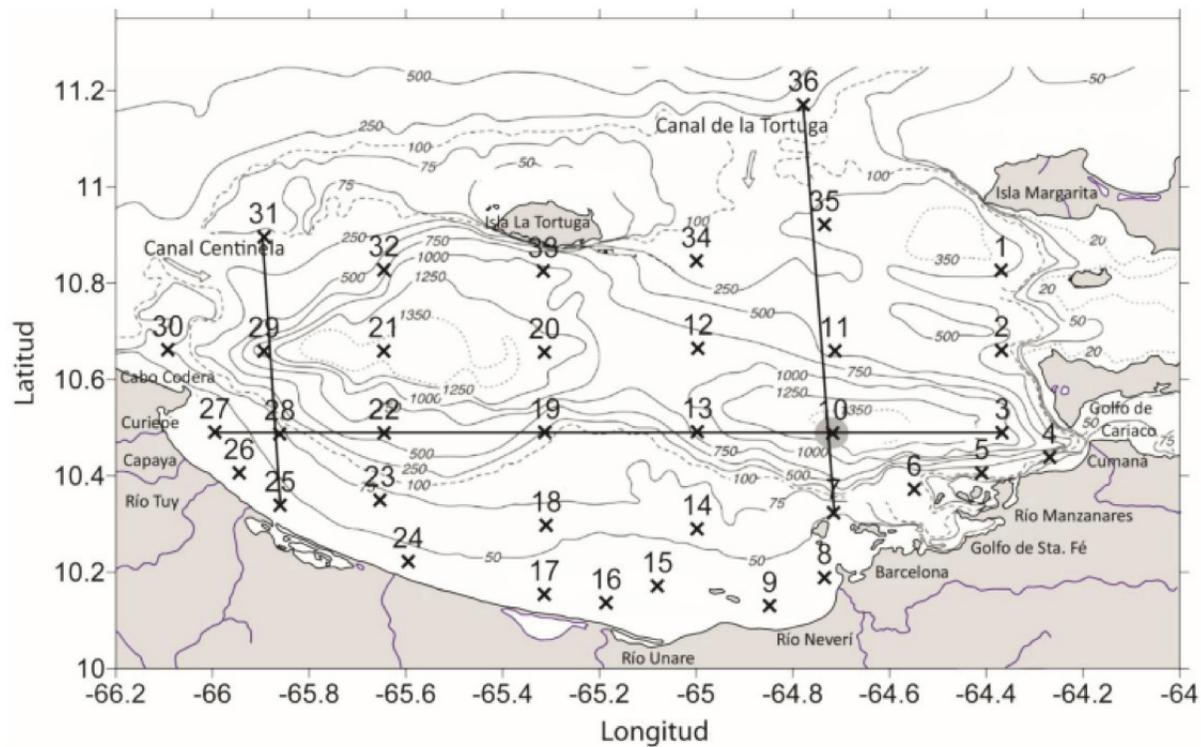


Figura 1. Mapa de la región de la Fosa de Cariaco. Las estaciones visitadas durante las campañas FOSA 1 y FOSA 2 se indican con la "X" y su número de orden. El círculo gris en la estación 10 indica la ubicación de la estación de la Serie de Tiempo CARIACO (10,49°N-64,71°O). Se muestra la batimetría y el nombre de los sitios geográficos y ríos más notables. Las tres líneas que unen estaciones indican el corte de los transeptos que se muestran en las figuras 5, 6 y 9.

mediciones fue de 0,5 % para  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NO}_2^-$ , 1,3 % para el  $\text{NH}_4^+$ , 2,0 % para el fósforo y 0,2 % para el ácido silícico. Los límites de detección fueron 0,01  $\mu\text{M}$  para el nitrito; 0,13  $\mu\text{M}$  para nitrito + nitrato; 0,38  $\mu\text{M}$  para el amonio; 0,09  $\mu\text{M}$  para el fosfato y 0,18  $\mu\text{M}$  para el ácido silícico. Las concentraciones de  $\text{Chla}$  se determinaron con un Fluorómetro Turner Design 10-AU-005, a una precisión de 0,01  $\mu\text{g L}^{-1}$ ; una descripción detallada de este análisis y el de los nutrientes se encuentra en Astor *et al.* (2013).

### Datos meteorológicos

La información del viento para el período de estudio se obtuvo de la estación meteorológica del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrografía ubicada en Punta de Piedras, Isla Margarita (Campus de la Fundación La Salle de Ciencias Naturales). Datos de precipitación de otras localidades fueron extraídos del *Monthly Climatic Data for the World Publications*: (<http://www7.ncdc.noaa.gov/IPSMCDW/mcdw.html>).

La precipitación se utiliza como sustituta de la variabilidad en la descarga de los ríos, ya que el caudal de los ríos que vierten en la cuenca de Cariaco no se mide de manera regular. Los registros de precipitación de Caracas, Barcelona y Cumaná fueron seleccionados para representar las variaciones en la descarga del Tuy, el Unare, el Neverí y el río Manzanares, respectivamente (Figura 2A) (Márquez *et al.* 2002, Lorenzoni *et al.* 2009).

### Procedimientos estadísticos

Para comparar las variables temperatura, salinidad, nutrientes y clorofila entre los periodos de estabilidad y surgencia (septiembre, marzo) y entre las cuencas (occidental y oriental), se realizaron pruebas de Kruskal-Wallis usando las medianas, y se muestran los resultados en graficas de cajas Whisker. Se utilizó para ello el programa Statgraphics Centurion XVI.

## Resultados

### Precipitación y viento

La precipitación en Cumaná, Barcelona y Caracas exhibió el patrón normal de altas precipitaciones durante los meses de septiembre a noviembre de 2008, de baja precipitación durante diciembre-mayo 2008–2009, y el consiguiente aumento de la precipitación después de esos meses (Figura 2A).

El componente zonal (este-oeste) de la velocidad del viento en octubre 2008 estuvo próximo al promedio mensual histórico ( $-4,0 \text{ m s}^{-1}$ ); en cambio, para el mes de marzo 2009, el viento fue más débil ( $-4,5 \text{ m s}^{-1}$ ) que el promedio para el mes ( $-6,0 \text{ m s}^{-1}$ ) (Figura 2B). Los vientos en la región fueron particularmente débiles durante el primer semestre de 2009. Además, hubo alta variabilidad en los promedios diarios de la velocidad del viento en los días previos y durante las respectivas campañas de FOSA. Por ejemplo, los 15 días previos al inicio de FOSA 1 y durante la campaña el componente zonal fue variable entre  $-1,4$  y  $-4,4 \text{ m s}^{-1}$ , mientras que en los días previos a FOSA 2 la velocidad se situó entre  $-6,0$  y  $-7,0 \text{ m s}^{-1}$  pero durante la campaña la intensidad del viento bajó entre  $-2,4$  a  $-4,5 \text{ m s}^{-1}$ .

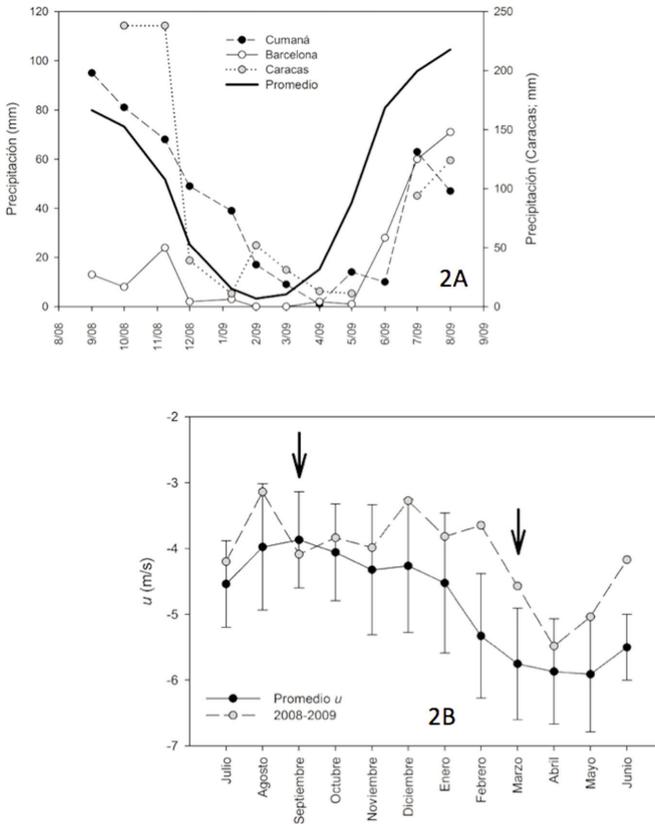


Figura 2 A) Precipitación (mm) para tres estaciones meteorológicas seleccionadas: Cumaná, Barcelona y Caracas. Nótese la diferente escala de los valores de precipitación para Caracas (eje derecho). El promedio de precipitación para las tres estaciones se indica con la línea gruesa. B) Velocidad del componente zonal del viento ( $u$ ,  $\text{ms}^{-1}$ ) en Punta de Piedras (Margarita). La línea continua es el promedio mensual de 13 años (1996–2009), la línea discontinua es el promedio para el periodo de estudio (2008–2009). Los valores negativos de  $u$  representa el componente del viento hacia el oeste. Las flechas marcan los periodos durante las campañas FOSA 1 y FOSA 2.

### Hidrografía

Considerando toda la cuenca de la Fosa de Cariaco, en septiembre 2008 el valor promedio de la temperatura en la superficie fue de  $29,06 \pm 0,36$  °C y la salinidad de  $36,17 \pm 0,22$  (Tabla 1). Las aguas superficiales del Caribe (CSW) mostraron igualmente altas temperaturas ( $> 28$  °C) y salinidad por debajo de 36,4 (Figuras 3 y 4A). En los transeptos este – oeste y norte – sur (Figura 5) se observó una fuerte estratificación térmica sin una diferencia apreciable entre una cuenca y otra, mientras que la

salinidad mostró valores algo más bajos ( $\Delta = 0,82$ ) hacia el extremo nor-occidental (Figuras 3 y 6). La *SUW*, ( $> 36,8$ ) se ubicó entre los 75 y 120 m, con un volumen mayor hacia la cuenca oriental (Figura 6). En septiembre de 2008, en la parte sur de la Fosa adyacente al continente, la pluma del río Unare tenía una temperatura promedio de  $28,38$  °C y salinidad de  $36,24$ ; la del río Tuy de  $28,53$  °C y salinidad de  $36,02$ ; Neverí de  $28,67$  °C y salinidad de  $36,29$ ; y el Manzanares  $29,18$  °C y salinidad de  $36,35$  (posición de los ríos en la figura 1).

En marzo de 2009, la temperatura promedio superficial disminuyó y la salinidad aumentó en toda la región ( $24,74 \pm 1,0$  °C;  $36,79 \pm 0,24$ ), y se notó una clara diferencia entre las dos sub-cuencas. En la occidental, las temperaturas resultaron superiores a  $24,7$  °C con un valor promedio de  $25,42 \pm 0,5$  °C, y en la cuenca oriental el valor promedio fue  $24,09 \pm 0,95$  °C. La salinidad casi no varió entre las cuencas ( $\sim 36,8$ ) (Tabla 1), indicando la presencia del agua subtropical (*SUW*) en gran parte de la superficie (Figura 4B). En la parte sureste de la Fosa de Cariaco, el área con las temperaturas más bajas identifica la zona de surgencia. Durante el muestreo del 2009, la zona de surgencia estuvo confinada cerca de la costa (Figura 3), con el foco cerca del Golfo de Santa Fe (Estación 5;  $22,67$  °C).

En profundidad, las isotermas mostraron en marzo una inclinación de este a oeste y de sur a norte, y esta disposición fue más notoria en la cuenca oriental (Figura 5). La isoterma de  $24$  °C alcanzó la superficie en el sureste de la Fosa. La capa con temperaturas entre los  $20$  y  $24$  °C, que en septiembre estaba confinada entre los  $90$  y  $120$  m, se amplió especialmente en la cuenca oriental, donde se localizó entre la superficie y los  $120$  m. La salinidad máxima ( $> 36,8$ ) en marzo se encontró desde la superficie hasta unos  $50$ – $60$  m de profundidad, y en superficie se registró en el sur-oriente, centro y nor-occidente de la Fosa (Figura 6). En marzo de 2009 solo la pluma del río Unare fue perceptible en el sector sur como agua algo más cálida que su entorno ( $26,02$  °C, estación 16); la pluma del río Tuy fue relativamente más fría ( $25,42$  °C) y de menor salinidad ( $36,29$ ), y no fue posible identificar las plumas del Manzanares y el Neverí.

Para determinar si las diferencias observadas entre campañas y entre cuencas son significativas, se realizó la prueba de Kruskal-Wallis a los valores de temperatura y la salinidad superficial (Figuras 7A y 7B). Aunque se encontró una diferencia significativa ( $p < 0,05$ ) entre campañas tanto para la temperatura como para la salinidad, la temperatura no mostró una diferencia significativa entre cuencas durante la época de estabilidad, pero sí en la época de surgencia, cuando la cuenca oriental presentó aguas más frías. En este análisis también se observó que el gradiente de la TSM fue más marcado en la cuenca oriental durante la surgencia. En el caso de la salinidad ocurrió lo contrario: en la época de estabilidad la cuenca occidental mostró una menor salinidad que la oriental, mientras que en la época de surgencia no hubo diferencia significativa entre las cuencas. Se destaca además que el rango de la salinidad durante la surgencia fueron mínimas en la cuenca oriental, y más amplio durante la estabilidad en la cuenca occidental.

Tabla 1. Temperatura, salinidad, y concentración de nutrientes y clorofila en superficie en las estaciones visitadas en la región de la Fosa de Cariaco durante septiembre 2008 y marzo 2009. Concentración de nutrientes en  $\mu\text{M}$ . Clorofila (Chla) en  $\mu\text{g L}^{-1}$ .

Estac.	Lat.	Lon.	Septiembre 2008							Marzo 2009						
			TSM °C	Sal.	$\text{NO}_3^-$ $\mu\text{M}$	$\text{NH}_4^+$ $\mu\text{M}$	$\text{PO}_4^{3-}$ $\mu\text{M}$	$\text{Si(OH)}_4^-$ $\mu\text{M}$	Chla $\mu\text{g L}^{-1}$	TSM °C	Sal.	$\text{NO}_3^-$ $\mu\text{M}$	$\text{NH}_4^+$ $\mu\text{M}$	$\text{PO}_4^{3-}$ $\mu\text{M}$	$\text{Si(OH)}_4^-$ $\mu\text{M}$	Chla $\mu\text{g L}^{-1}$
1	10,83	-64,37	29,75	36,37	0	0,28	0	1,63	0,11	24,25	36,71	0,03	0	0	0,05	1,73
2	10,67	-64,37	29,49	36,06	---	---	---	---	0,15	23,73	36,81	---	---	---	---	1,1
3	10,5	-64,37	28,85	36,29	0,01	0,09	0	1,84	0,17	23,19	36,8	1,69	0,54	0,1	0,47	1,77
4	10,45	-64,27	29,18	36,35	0,1	0,04	0,01	2,18	0,18	23,19	36,7	2,36	0,2	0,06	0,99	1,02
5	10,42	-64,41	29,14	36,32	0,1	0,5	0	2,22	0,24	22,67	36,85	2,18	0,33	0,12	0,83	3,43
6	10,38	-64,55	29,27	36,31	0,15	0,1	0	2,11	0,17	23,35	36,86	1,49	1,18	0,13	0,05	2,34
7	10,33	-64,72	28,89	36,28	0,1	0,05	0	1,98	0,15	23,64	36,86	7,11	0	0,25	2,93	1,47
8	10,2	-64,73	28,69	36,29	0,11	0,29	0,06	2,27	0,83	23,22	36,88	10,53	0,84	0,61	1,88	1,42
9	10,21	-64,85	28,63	36,2	0,11	0,16	0,02	2,69	0,45	23,81	36,88	0,06	0,89	0,02	0	1,58
10	10,5	-64,72	29,23	36,22	0	0,35	0,01	---	0,12	23,92	36,86	0,31	1,05	0,03	0,08	0,57
11	10,67	-64,71	28,99	36,29	0,14	0,15	0,03	1,21	0,1	24,55	36,87	0,03	0,26	0	0,38	0,14
12	10,67	-65	28,91	36,28	0,24	0,2	0,01	1,18	0,11	24,07	36,87	0,07	0,09	0	0,82	0,36
13	10,5	-65	29,06	36,24	0,13	0,36	0,01	1,46	0,1	24,5	36,91	0,04	0,13	0	4	0,17
14	10,3	-65	28,72	36,27	0,06	0,17	0,02	2,25	0,12	24,62	36,9	0,04	0,08	0,01	1,99	0,49
15	10,18	-65,08	28,38	36,38	0,07	0,23	0,02	2,75	0,49	25,53	36,94	0,01	0,01	0,01	2,66	0,52
16	10,15	-65,19	28,4	36,12	0,12	0,54	0,07	3,57	0,93	26,52	36,88	0,76	0,28	0,16	4,76	1,1
17	10,17	-65,32	28,89	36,37	0,1	0,18	0,02	1,88	0,41	26,39	36,79	0,63	0,25	0,07	2,5	1,09
18	10,31	-65,31	29,17	36,32	0,02	0,25	0,01	1,16	0,12	25,76	36,95	0,14	0,47	0	1,46	0,15
19	10,5	-65,32	29,23	36,14	0,28	0,18	0,02	0,88	0,19	25,12	36,92	0,04	0,01	0,01	2,09	0,11
20	10,66	-65,32	29,3	36,18	0,06	0,25	0	3,24	0,1	24,86	36,9	0,02	0	0,02	0,31	0,19
21	10,67	-65,65	29,05	36,09	0,03	0,16	0,02	1,33	0,15	25,46	36,76	0,25	0,5	0,02	0,42	0,11
22	10,5	-65,65	29,45	36,11	0,03	0,36	0,01	1,02	0,17	25,46	36,88	0,1	0,84	0,02	0	0,13
23	10,36	-65,66	29,2	36,26	0,01	0,23	0,01	1,02	0,11	---	---	0,09	0,66	0,01	0,34	0,2
24	10,23	-65,6	28,66	36,32	0,01	0,19	0,02	2,37	0,29	26,56	36,28	0,44	0,3	0,11	2,93	0,75
25	10,35	-65,87	28,2	36,29	0,02	0,23	0,01	1,45	0,23	25,52	36,53	0,01	0	0,11	0,84	0,38
26	10,42	-65,95	28,83	36,12	0,03	0,19	0,01	1,43	0,33	25,55	35,6	0,06	0,55	0,16	2,3	0,44
27	10,5	-66	28,57	35,63	2,05	6,65	0,24	7,44	2,21	25,2	36,74	---	---	---	---	0,37
28	10,5	-65,87	29,13	36,05	0	0,69	0	0,97	0,4	25,05	36,78	0,03	0,13	0,02	0,26	0,35
29	10,67	-65,9	29,17	35,55	0,05	0,34	0,01	1,47	0,07	25,23	36,91	0,13	0,01	0	1,11	0,16
30	10,67	-66,1	29,81	35,57	0,04	0,21	0,01	3,48	0,16	25,43	36,84	0,21	0,4	0,01	1,57	0,37

Tabla 1. (Cont.)

Estac.	Lat.	Lon.	Septiembre 2008							Marzo 2009						
			TSM °C	Sal.	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> μM	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> μM	PO <sub>4</sub> <sup>=</sup> μM	Si(OH) <sub>4</sub> <sup>-</sup> μM	Chl <sub>a</sub> μgL <sup>-1</sup>	TSM °C	Sal.	NO <sub>3</sub> μM	NH <sub>4</sub> μM	PO <sub>4</sub> μM	Si(OH) <sub>4</sub> <sup>-</sup> μM	Chl <sub>a</sub> μgL <sup>-1</sup>
31	10,9	-65,9	29,17	35,7	0,09	0,24	0,01	1,43	0,09	25,64	36,93	0,03	0,1	0,02	0,47	0,13
32	10,83	-65,65	29,39	36,1	0,02	0,13	0	1	0,11	25,45	36,92	0,03	0,35	0,01	0,55	0,15
33	10,83	-65,32	29,33	36,16	0,09	0,23	0	2,88	0,11	24,81	36,91	---	---	---	0,2	0,3
34	10,85	-65	29,03	36,24	0,03	0,19	0,01	0,83	0,09	24,71	36,89	0,87	0,23	0,05	0,47	0,18
35	10,93	-64,73	28,96	36,4	0,09	0,56	0	3,4	0,15	24,69	36,89	0,08	0,27	0,01	0,3	0,18
36	11,17	-64,78	28,96	36,13	0,07	0,27	0,01	0,97	0,09	24,33	36,73	0,12	0,24	0,01	0	0,12

	Septiembre 2008							Marzo 2009						
	TSM	Sal.	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	Si(OH) <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Chl <sub>a</sub>	TSM	Sal.	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	Si(OH) <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Chl <sub>a</sub>
<b>Medias</b>														
Todas estaciones	29,03	36,17	0,13	0,44	0,02	2,03	0,28	24,74	36,79	0,91	0,34	0,07	1,18	0,70
Des. Std. Todas	0,36	0,22	0,34	1,09	0,04	1,25	0,38	1,00	0,24	2,18	0,32	0,12	1,23	0,75
Estaciones occidentales	29,09	36,07	0,16	0,61	0,02	1,96	0,30	25,42	36,74	0,19	0,30	0,04	1,05	0,31
Des. Std. Occid.	0,36	0,27	0,47	1,51	0,05	1,59	0,49	0,50	0,34	0,25	0,26	0,05	0,92	0,25
Estaciones orientales	28,97	36,27	0,10	0,25	0,02	2,18	0,27	24,09	36,85	1,67	0,38	0,09	1,39	1,14
Des. Std. Orient.	0,36	0,09	0,06	0,17	0,02	0,70	0,26	0,95	0,06	2,97	0,39	0,16	1,50	0,88
<b>Medianas</b>														
Todas estaciones	29,06	36,24	0,07	0,23	0,01	1,74	0,15	24,81	36,87	0,10	0,26	0,02	0,69	0,37
Cuartil 25%	28,85	36,12	0,025	0,175	0	1,19	0,11	24	36,79	0,04	0,09	0,01	0,303	0,17
Cuartil 75%	29,23	36,3	0,105	0,315	0,02	2,345	0,25	25,46	36,9	0,63	0,5	0,1	1,963	1,09
Estaciones occidentales	29,17	36,13	0,03	0,23	0,01	1,43	0,16	25,45	36,88	0,10	0,28	0,02	0,55	0,20
Cuartil 25%	28,93	36,06	0,02	0,19	0,01	1,02	0,11	25,12	36,76	0,03	0,078	0,01	0,34	0,15
Cuartil 75%	29,28	36,26	0,08	0,25	0,018	2,248	0,275	25,55	36,91	0,22	0,48	0,055	1,57	0,37
Estaciones orientales	28,96	36,29	0,10	0,22	0,01	2,18	0,15	23,92	36,87	0,20	0,27	0,03	0,83	1,10
Cuartil 25%	28,71	36,24	0,065	0,125	0	1,683	0,12	23,32	36,84	0,04	0,085	0,005	0,23	0,51
Cuartil 75%	29,19	36,31	0,125	0,32	0,02	2,265	0,29	24,51	36,88	1,935	0,69	0,125	2,325	1,62

Nota: Estaciones occidentales: 17 a 34 sombreadas en gris  
 Estaciones orientales: 1 a 16 y 35  
 Estación 36 exterior a la Fosa está considerada solo en los totales

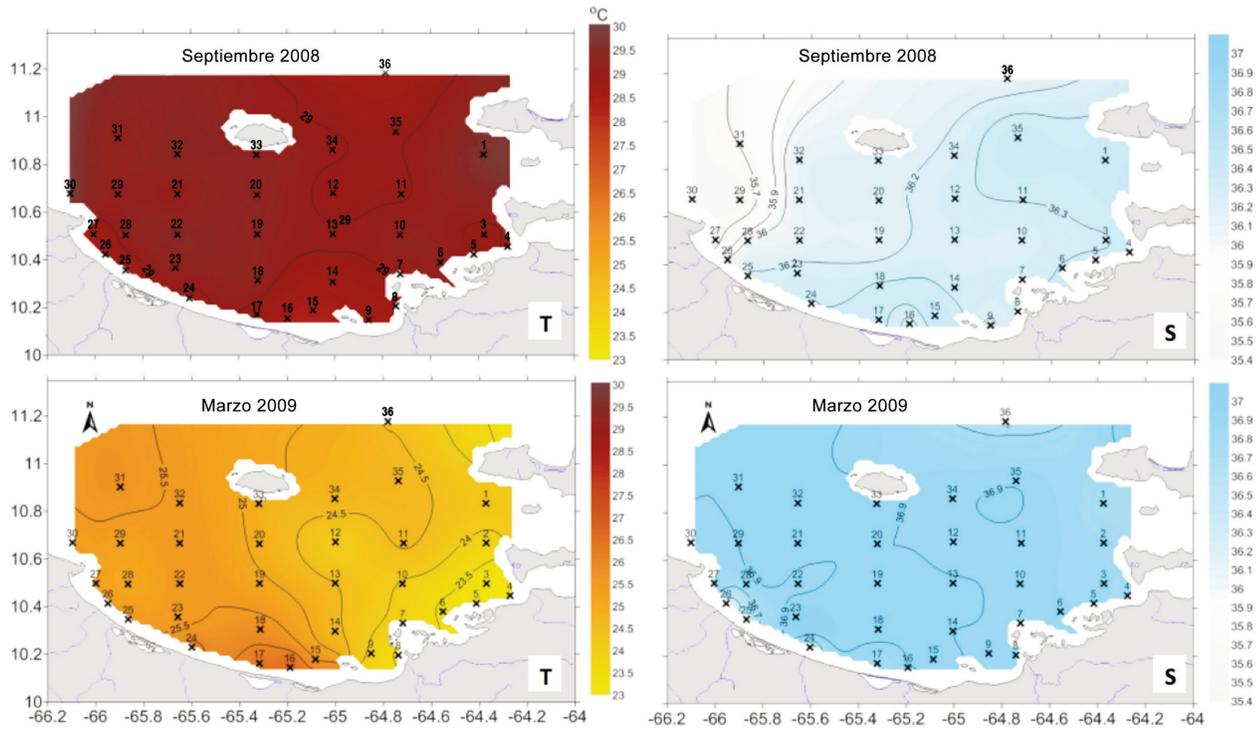


Figura 3. Distribución de la temperatura (derecha) y salinidad (izquierda) superficial en la región de la Fosa de Cariaco durante septiembre 2008 (arriba) y marzo de 2009 (abajo).

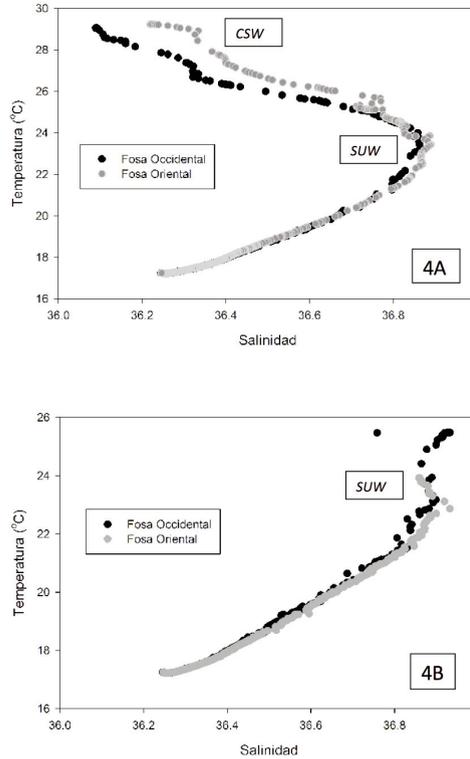
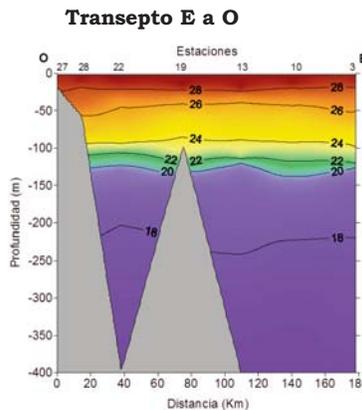
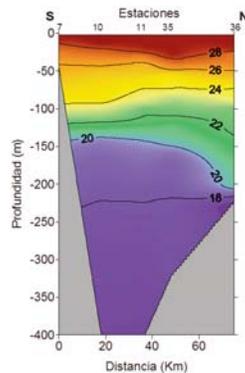


Figura 4. Diagramas T-S en la Fosa de Cariaco, para la estación 10 (cuenca oriental; línea gris) y estación 21 (cuenca occidental; línea negra), en septiembre de 2008 (4A) y marzo 2009 (4B). Máxima profundidad de muestreo 1300 m y 1382 m respectivamente. *CSW*, agua superficial del Caribe; *SUW*, agua Subtropical Inferior. Nótese la diferencia en la escala de la temperatura.

La figura 8 muestra la distribución superficial (1 m) del nitrato en septiembre 2008 y marzo 2009 como ejemplo de la distribución de los nutrientes. En septiembre 2008 la concentración del nitrato fue baja en las aguas superficiales de la Fosa (mediana=  $0,07 \mu\text{M}$ ,  $Q_1=0,025$   $Q_3=0,105 \mu\text{M}$ ), excepto en la pluma del río Tuy (Estación 27), donde la concentración de  $\text{NO}_3^-$  fue de  $\sim 2 \mu\text{M}$ , y donde también fueron altos el amonio, fosfato y silicato, ( $6,65 \mu\text{M NH}_4^+$ ;  $0,24 \mu\text{M PO}_4^{3-}$ ;  $7,44 \mu\text{M Si(OH)}_4^-$ ; Tabla 1). El valor de la mediana del  $\text{NO}_3^-$  en el occidente fue de  $0,03 \mu\text{M}$  ( $Q_1=0,02$   $Q_3=0,08 \mu\text{M}$ ) y en el oriente de  $0,1 \mu\text{M}$  ( $Q_1=0,065$   $Q_3=0,125 \mu\text{M}$ ). Durante marzo 2009, la concentración de  $\text{NO}_3^-$  fue  $\sim 2 \mu\text{M}$  en la zona de surgencia (estaciones costeras al sureste de la Fosa),  $\sim 0,1 \mu\text{M}$  ( $Q_1=0,03$   $Q_3=0,22 \mu\text{M}$ ) para todo el sector occidental y  $\sim 0,2 \mu\text{M}$  ( $Q_1=0,04$   $Q_3=1,93 \mu\text{M}$ ) en el oriental. La mediana general para toda la cuenca fue de  $0,1 \mu\text{M}$  ( $Q_1=0,04$   $Q_3=0,63 \mu\text{M}$ ). Concentraciones particularmente altas se observaron cerca de la desembocadura del río Neverí ( $10,53 \mu\text{M}$ ).

## Temperatura

Sep.  
2008  
FOSA 1

**Oriental S a N****Occidental S a N**

This cross-section shows temperature profiles from 0 to 400 meters depth along the S-N axis in the western part of the basin. The x-axis represents distance in kilometers (0 to 60), and the y-axis represents depth in meters (-400 to 0). A color scale on the right indicates temperature in degrees Celsius, ranging from 16 (dark purple) to 29 (dark red). Isotherms are labeled with values such as 28, 26, 24, 22, 20, and 18. The plot shows a clear stratification with a warm surface layer and a deep, cold bottom layer.

Mar.  
2009  
FOSA 2

**Transecto E a O**

This cross-section shows temperature profiles from 0 to 400 meters depth along the E-O axis. The x-axis represents distance in kilometers (0 to 180), and the y-axis represents depth in meters (-400 to 0). A color scale on the right indicates temperature in degrees Celsius, ranging from 16 (dark purple) to 29 (dark red). Isotherms are labeled with values such as 24, 22, 20, and 18. The plot shows a clear stratification with a warm surface layer and a deep, cold bottom layer.

**Oriental S a N**

This cross-section shows temperature profiles from 0 to 400 meters depth along the S-N axis in the eastern part of the basin. The x-axis represents distance in kilometers (0 to 60), and the y-axis represents depth in meters (-400 to 0). A color scale on the right indicates temperature in degrees Celsius, ranging from 16 (dark purple) to 29 (dark red). Isotherms are labeled with values such as 24, 22, 20, and 18. The plot shows a clear stratification with a warm surface layer and a deep, cold bottom layer.

**Occidental S a N**

This cross-section shows temperature profiles from 0 to 400 meters depth along the S-N axis in the western part of the basin. The x-axis represents distance in kilometers (0 to 60), and the y-axis represents depth in meters (-400 to 0). A color scale on the right indicates temperature in degrees Celsius, ranging from 16 (dark purple) to 29 (dark red). Isotherms are labeled with values such as 24, 22, 20, and 18. The plot shows a clear stratification with a warm surface layer and a deep, cold bottom layer.

Figura 5. Transectos de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) en la Fosa de Cariaco hasta 400 m de profundidad, en un corte a lo largo del eje oeste - este (izquierda), y dos cortes de sur a norte, uno en la cuenca occidental (centro) y otro en la oriental (derecha) (para ubicación ver fig. 1). Grupo de gráficas superiores durante la campaña FOSA 1 (septiembre de 2008) e inferiores durante FOSA 2 (marzo 2009).

El patrón de distribución de la clorofila *a* (Chla) superficial (Figura 8) fue similar al del  $\text{NO}_3^-$ . Las concentraciones resultaron muy bajas durante septiembre 2008 y similares en ambas cuencas (mediana de  $0,15 \mu\text{g L}^{-1}$ ,  $Q_1=0,11$   $Q_3=0,25 \mu\text{g L}^{-1}$ ), con un pico cerca de la desembocadura del río Tuy ( $2,2 \mu\text{g L}^{-1}$ , Tabla 1 Estación 27). La cantidad de Chla aumentó durante la época de surgencia ( $0,37 \mu\text{g L}^{-1}$ ,  $Q_1=0,17$ ;  $Q_3=1,09 \mu\text{g L}^{-1}$ ) y fue mayor en la cuenca oriental ( $1,1 \mu\text{g L}^{-1}$ ,  $Q_1=0,51$   $Q_3=1,62 \mu\text{g L}^{-1}$ ) que en la occidental ( $0,20 \mu\text{g L}^{-1}$ ,  $Q_1=0,15$   $Q_3=0,37 \mu\text{g L}^{-1}$ ), con un máximo cerca del Golfo de Santa Fe (estación 5:  $3,4 \mu\text{g L}^{-1}$ ) donde la temperatura superficial del mar (TSM) fue más baja.

La distribución en profundidad de la clorofila mostró dos patrones diferentes, según la época y la cuenca. El máximo de Chla establecido por el perfil de fluorescencia fue en general más profundo en septiembre (50–60 m) que en marzo (0–40 m) (Figura 9). Durante la época de surgencia, y en particular en la cuenca oriental, se observaron altas concentraciones de Chla en aguas costeras superficiales (0–20 m) y un progresivo hundimiento (40–50 m) en las estaciones alejadas de la costa. Esto generó una disposición de la Chla en un plano inclinado en dirección norte y hacia el oeste (Figura 9). En cambio, durante la época de estabilidad y lluvias el nivel del máximo de Chla se mantuvo relativamente horizontal a ~60 m de profundidad. La diferencia significativa que se observó en la Chla entre campañas y entre cuencas fue mayormente debida a la concentración más alta de clorofila presente en la cuenca oriental en la época de surgencia.

## Discusión

En la Fosa de Cariaco se perciben diferencias en la hidrografía entre épocas y entre los sectores oriental y occidental de la Fosa. Estas diferencias están inducidas principalmente por la surgencia que se manifiesta estacionalmente en la zona sur del mar Caribe entre enero y abril/mayo, fenómeno regulado por las variaciones atmosféricas en los vientos alisios del NE (Muller-Karger y Aparicio 1994, Muller-Karger *et al.* 2010, Rueda-Roa y Muller-Karger 2013). La expresión de la surgencia no sólo depende de la fuerza y dirección del viento, sino también de la orientación de la línea de costa. En relación con el contorno y batimetría de la Fosa de Cariaco, los vientos producen un efecto de surgencia mayor en el sector sureste, donde la orientación de costa está alineada con la dirección dominante del viento del ENE, y donde se estrecha la plataforma de Unare (< 10 km en comparación con > 20 km en la parte central y occidental; Figura 1). La combinación de la dirección de la línea de costa y una mayor pendiente de la plataforma favorece las condiciones para el afloramiento de aguas sub-superficiales (Allen *et al.* 1995, Gan *et al.* 2009, Jacox y Edwards 2011). El principal foco de surgencia en la región se observó cerca del Golfo de Santa Fe, al sur de la entrada al Golfo de Cariaco con temperaturas alrededor de 22 a 23 °C, consistente con observaciones anteriores (Herrera y Febres-Ortega 1975, Herrera *et al.* 1980, Walsh *et al.* 1999, Castellanos *et al.* 2002, Lorenzoni 2005, Rueda 2012).

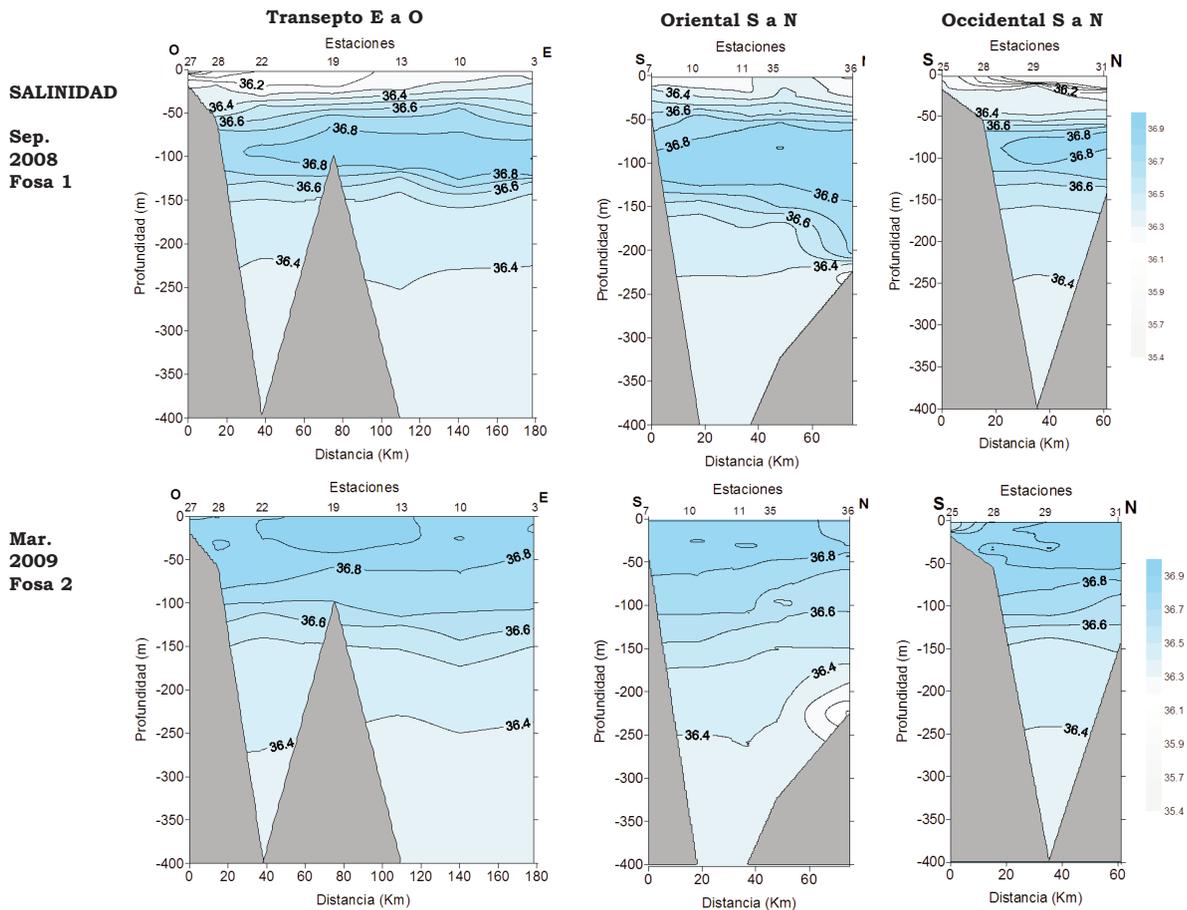


Figura 6. Transectos de salinidad en la Fosa de Cariaco hasta 400 m de profundidad, en un corte a lo largo del eje oeste - este (izquierda), y dos cortes de sur a norte, uno en la cuenca occidental (centro) y otro en la oriental (derecha) (para ubicación ver fig. 1). Grupo de gráficas superiores durante la campaña FOSA 1 (septiembre de 2008) e inferiores durante FOSA 2 (marzo 2009).

En marzo 2009 se encontró que el afloramiento de las aguas más frías ( $< 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) estuvo limitado al sector sureste de la sub-cuenca oriental, la cual fue un área de surgencia pequeña, en relación a años anteriores (e.g. Muller-Karger *et al.* 2004), pues las condiciones eólicas en febrero y marzo de 2009 fueron débiles comparadas con los valores históricos del mes. En efecto, el resto de la sub-cuenca tuvo una TSM  $> 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ , en promedio  $\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  más caliente de lo que se ha observado en otras épocas de surgencia (Lorenzoni 2012). En la estación CARIACO (estación 10), la TSM fue  $\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  más elevada que el valor promedio para el mes (1996–2010) (<http://imars.marine.usf.edu/cariaco>). Si bien existe una variabilidad interanual considerable en la fuerza de la surgencia en el sector oriental de la Fosa de Cariaco (Rueda-Roa y Muller-Karger 2013), ha habido un calentamiento progresivo de las aguas superficiales de la Fosa, inducido en buena parte por cambios atmosféricos que se manifiestan en una tendencia hacia una menor intensidad del viento, y por consiguiente una menor intensidad en la surgencia (Taylor *et al.* 2012, Astor *et al.* 2017).

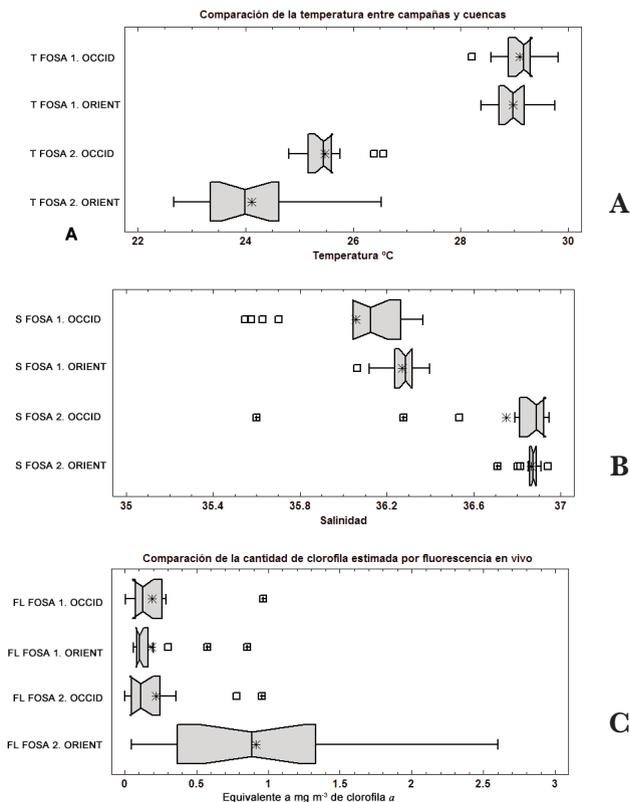


Figura 7. Gráficas de cajas comparando los valores en superficie de temperatura (A) salinidad (B) y clorofila (C) de las estaciones situadas al occidente con las situadas al oriente en la región de la Fosa de Cariaco, y entre las dos campañas realizadas FOSA1 (septiembre 2008) y FOSA2 (marzo 2009). Un análisis de Kruskal-Wallis y Friedman indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre los grupos de datos.

En referencia a la salinidad, durante marzo de 2009 (surgencia) el agua subtropical (*SUW*) ocupó los primeros ~75–80 m de la columna de agua, en particular en el este y sur de la Fosa. Se conoce que la *SUW* alcanza sus niveles más someros durante los primeros cuatro meses del año (Herrera *et al.* 1980, Astor *et al.* 2003). La salinidad fue similar en ambas sub-cuencas en marzo y significativamente ( $p < 0,05$ ) diferente en la época de estabilidad y lluvia, cuando en el sector occidental hubo una disminución en la salinidad debido a una mayor influencia de los ríos locales al sur y occidente, y al ingreso del agua superficial del Caribe (*CSW*), lo que generó diferencias ( $\Delta = 0,63$ ) en la salinidad entre las cuencas. Durante septiembre de 2008, cuando los vientos fueron más débiles, se observó una fuerte estratificación en toda el área de la Fosa, consistente con lo que previamente se ha indicado para la temporada de estabilidad y de lluvias (Astor *et al.* 1998).

Por lo tanto, dos procesos determinan las diferencias entre épocas y entre las sub-cuencas: la surgencia, que genera diferencias en la temperatura y la salinidad tanto superficiales como en la columna de agua, y las lluvias que influyen cerca de la costa en la variación de salinidad a nivel de la superficie a través de la descarga de los ríos.

La temperatura superficial del mar, la salinidad y las corrientes son mayormente moduladas por procesos atmosféricos. La variabilidad de esos parámetros fundamentales suele tener un impacto significativo sobre la biología y ecología de una región (Emery y Hamilton 1985, Enfield y Mayer 1997, Giannini *et al.* 2001, Muller-Karger *et al.* 2015). En Cariaco, el patrón de distribución de clorofila superficial fue similar al del nitrato, y coherente con la distribución de la TSM. Por ende, durante la temporada de lluvias (septiembre de 2008) hubo una baja concentración y una mínima diferencia entre sub-cuencas, excepto en algunas estaciones cerca de la costa (Figura 8). Durante la surgencia (marzo de 2009) la concentración de *Chla* fue mayor en la sub-cuenca oriental como consecuencia de la mayor disponibilidad de los nutrientes (como el nitrato) presentes en las aguas afloradas (Astor *et al.* 1998, Muller-Karger *et al.* 2004). Sin embargo, consistente con temperaturas más cálidas y vientos más débiles de lo habitual para la época, la cantidad de *Chla* medida en la sub-cuenca oriental, específicamente en la estación de la serie de tiempo CARIACO (Estación 10) fue menor que los valores históricos para el mismo mes ( $0,57 \mu\text{g L}^{-1}$ , comparado con el promedio 1996–2009 CARIACO de  $2,19 \pm 2,24 \mu\text{g L}^{-1}$ ).

Estas diferencias ponen en evidencia que en la región de la Fosa de Cariaco existen distintos niveles de productividad y aportes de materia orgánica hacia el fondo según el sector de la Fosa que se trate. El sector occidental es menos productivo que el oriental, lo que extiende las posibilidades de usar la Fosa como un laboratorio natural para el conocimiento de los procesos climáticos, hidrográficos y productivos. Es una región que posee dos ambientes diferentes y cercanos, sobre los que actúan factores comunes, pero en distinto modo, intensidad y tiempo.

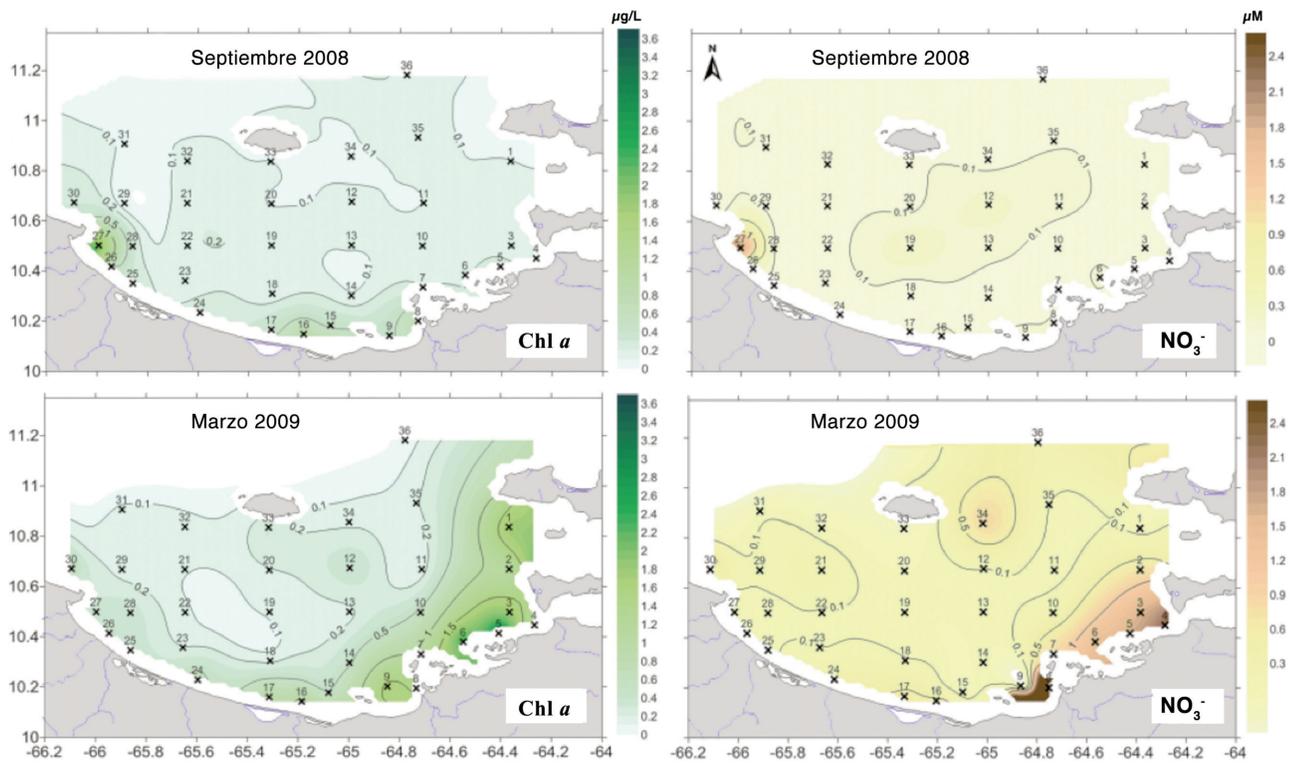


Figura 8 Distribución en superficie del nitrato  $\text{NO}_3^-$  ( $\mu\text{M}$ ) a la derecha y la clorofila *a* (Chl *a*;  $\mu\text{g L}$ ) a la izquierda, en la región de la Fosa de Cariaco durante septiembre 2008 (arriba) y marzo de 2009 (abajo).

## CLOROFILA

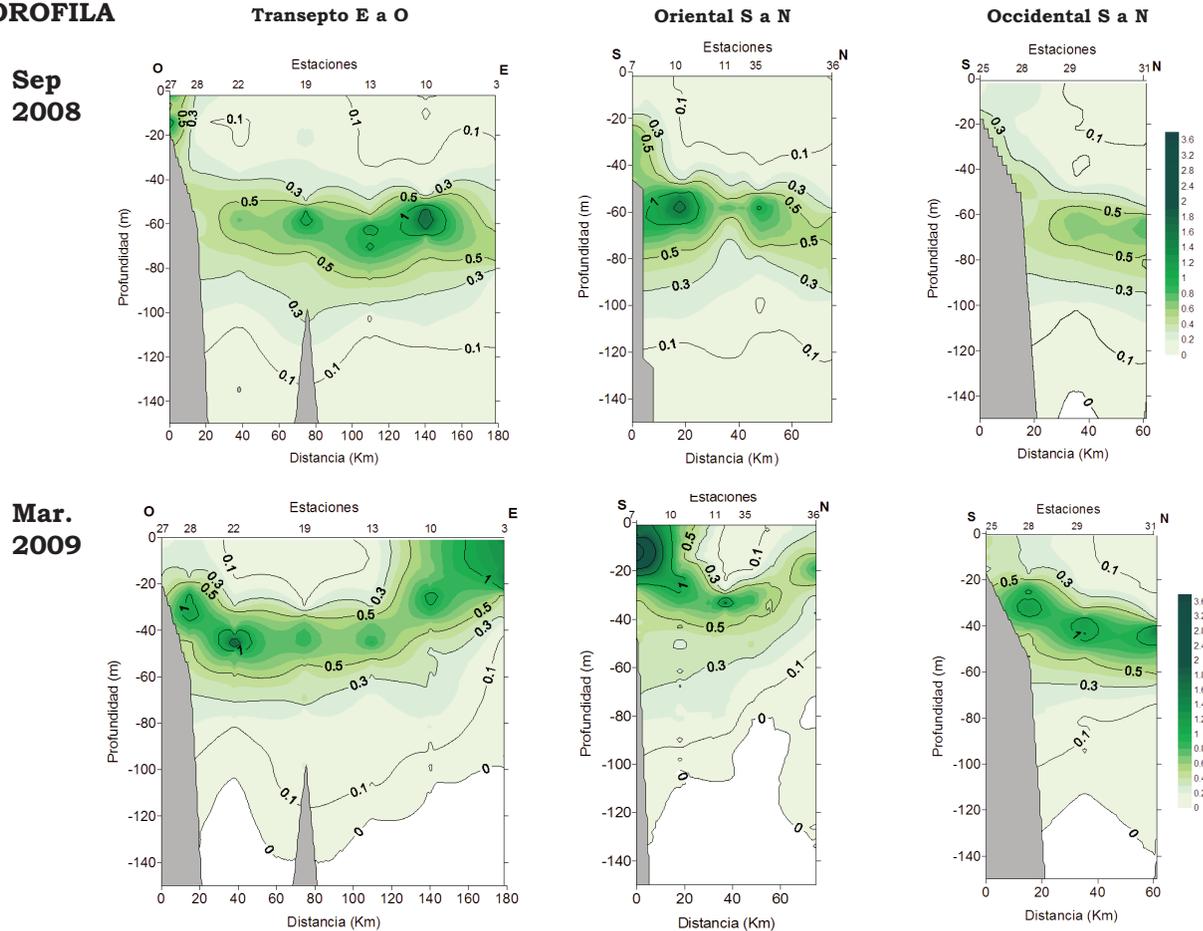


Figura 9. Transectos de la clorofila ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) estimada a partir de perfiles de fluorescencia in vivo en la Fosa de Cariaco hasta 140 m de profundidad, en un corte a lo largo del eje oeste - este (izquierda), y dos cortes de sur a norte, uno en la cuenca occidental (centro) y otro en la oriental (derecha) (para ubicación ver fig. 1). Grupo de gráficas superiores durante la campaña FOSA 1 (septiembre de 2008) e inferiores durante FOSA 2 (marzo 2009)

## Conclusiones

Mediante estas dos campañas se describieron, en forma cuasi sinóptica, las características de las dos sub-cuencas, en dos situaciones estacionales regidas principalmente por la presencia de la surgencia durante los primeros meses del año.

La TSM fue cálida y relativamente uniforme en ambas cuencas en septiembre, con una fuerte estratificación, mientras que en marzo se produjo una disminución de la temperatura y una marcada diferencia entre el sector occidental y el oriental con una temperatura más baja.

La salinidad varió en superficie, con valores relativamente bajos en septiembre en relación a marzo, por efecto del ascenso del agua Subtropical y el retiro de las aguas superficiales del Caribe en la región

La surgencia y en menor extensión la descarga de los ríos influye en los nutrientes y la cantidad de clorofila en las aguas superficiales. El afloramiento de aguas profundas es la causa del incremento de nutrientes y de clorofila en el sector costero sur oriental, y la descarga de los ríos influye en áreas cerca de la desembocadura, en especial el río Tuy y Neverí.

Las diferencias observadas en la hidrografía y la biogeoquímica de las sub-cuencas de la Fosa de Cariaco son inducidas por los cambios estacionales en el clima atmosférico. La cuenca oriental está más influenciada por el afloramiento inducido por el viento, mientras que la cuenca occidental tiene una estacionalidad menos pronunciada, aunque con mayores aportes fluviales a través del río Tuy. La temporada de surgencia del 2009 fue poco intensa en comparación con el registro histórico, lo que lleva a inferir que las diferencias entre las cuencas posiblemente llegan a ser más pronunciadas. Por estar ubicada en la sub-cuenca este, la estación CARIACO captura la variabilidad anual e interanual del fenómeno de surgencia que afecta a todo el límite sur del mar Caribe.

**Agradecimientos.** Este trabajo ha sido posible gracias al apoyo de la tripulación del buque oceanográfico Hermano Ginés, comandado por Aparicio Narváez, por su experiencia y trabajo abordo, y la colaboración de otras personas, profesionales y estudiantes que hicieron posible este plan de visita a toda la cuenca de la Fosa en dos oportunidades, de este modo se agradece la participación directa de José Jesús Narváez, Javier Campano, Susana Palma, Luis González, y Gustavo Fuentes. Este trabajo se dedica en memoria de Joaquín Buitrago que fue director de EDIMAR y que durante su gestión se inició el proyecto CARIACO, y a Marci Millán oficial de máquinas del B/O Hermano Ginés, quién nos acompañó en estas y otras muchas salidas al mar.

## Bibliografía.

ALLEN, J. S., P. A. NEWBERGER, Y J. FEDERIUK. 1995. Upwelling circulation on the Oregon continental shelf. Part I: Response to idealized forcing. *Journal of Physical Oceanography* 25, 1843–1866.

- ASTOR, Y., J. MERI Y F. MULLER-KARGER. 1998. Variabilidad estacional hidrográfica en la Fosa de Cariaco. *Memoria Sociedad Ciencias Naturales La Salle* 58(149): 61–72.
- ASTOR Y., F. MULLER-KARGER, Y M. I. SCRANTON. 2003. Seasonal and interannual variation in the hydrography of the Cariaco Basin: implications for basin ventilation. *Continental Shelf Research* 23:125–144.
- ASTOR, Y., L. LORENZONI, M. SCRANTON (Ed.). 2013. Manual de métodos para el análisis de parámetros oceanográficos en la estación serie de tiempo CARIACO. Colección Cuadernos FLASA. Serie Ciencia y Tecnología n° 12. Fundación La Salle de Ciencias Naturales. Caracas. ISBN 978-980-7090-17-9. 178 pp.
- ASTOR, Y., L. GUZMÁN, L. TROCCOLI, L. LORENZONI, F. MULLER-KARGER. 2017. Síntesis de las tendencias de los parámetros oceanográficos y ópticos en la estación serie de tiempo CARIACO (enero 1996-diciembre 2013). *Memoria Fundación La Salle Ciencias Naturales La Salle* (73)179–180: (en este mismo volumen).
- CASTELLANOS, P., R. VARELA R, F. MULLER-KARGER. 2002. Descripción de las áreas de surgencia al sur del Mar Caribe examinadas con el sensor infrarrojo AVHRR. *Memoria Fundación La Salle de Ciencias Naturales* (60)154: 55–76.
- EMERY, W. J., Y K. HAMILTON, 1985. Atmospheric Forcing of Interannual Variability. *Journal of Geophysical Research*, 90(C1): 857–868.
- ENFIELD, D. B., Y D. A. MAYER. 1997. Tropical Atlantic sea surface temperature variability. *Journal of Geophysical Research* 102(C1): 929–945.
- FEBRES-ORTEGA, G. Y L. HERRERA. 1975. Interpretación dinámica de algunas de las características oceanográficas de la Fosa de Cariaco, Mar Caribe. *Boletín Instituto Oceanográfico de la Universidad de Oriente* 14(1): 3–29.
- FERRAZ-REYES, E. 1983. Estudio del fitoplancton en la cuenca Tuy-Cariaco, Venezuela. *Boletín Instituto Oceanográfico de la Universidad de Oriente* 22(1–2): 111–124.
- GAN, J. P., A. CHEUNG, X. G. GUO, L. LI. 2009. Intensified upwelling over a widened shelf in the northeastern South China Sea. *Journal Geophysical Research*. 114:C09019. doi:10.1029/2007JC004660
- GARCÍA, A. J., J. BONILLA, Y J. BENÍTEZ. 1983. Condiciones hidroquímicas en las aguas superficiales de la cuenca Tuy-Cariaco. *Boletín del Instituto Oceanográfico de la Universidad de Oriente* 22(1–2): 87–101.
- GIANNINI, A., J. C. CHIANG, M. A. CANE, Y. KUSHNIR, Y R. SEAGER. 2001. The ENSO teleconnection to the tropical Atlantic Ocean: contributions of the remote and local SSTs to rainfall variability in the tropical Americas. *Journal of Climate* 14(24): 4530–4544.
- GORDON, L. I., J. C. JENNINGS JR, A. A. ROSS, Y J. M. KREST, 1993. A suggested protocol for continuous flow automated analysis of seawater nutrients (phosphate, nitrate, nitrite and silicic acid). *En: the WOCE Hydrographic Program and the Joint Global Ocean Fluxes Study. WOCE Operations Manual*, Part, 3(3): 91–1.
- HERRERA, L. E. Y G. FEBRES-ORTEGA. 1975. Procesos de surgencia y de renovación de aguas en la Fosa de Cariaco, Mar Caribe. *Boletín Instituto Oceanográfico de la Universidad de Oriente* 14, 31–44.
- HERRERA, L.E., G. FEBRES-ORTEGA Y J. M. ANDRÉS. 1980. Distribución de las masas de agua y sus vinculaciones dinámicas en el sector Centro-Occidental Venezolano, Mar Caribe. *Boletín Instituto Oceanográfico de la Universidad de Oriente* 19, 93–118.
- JACOX, M. G. Y C. A. EDWARDS. 2011. Effects of stratification and shelf slope on nutrient supply in coastal upwelling regions. *Journal of Geophysical Research* 116 (C03019), doi:10.1029/2010JC006547.
- LORENZONI, L. 2012. Sediment transport and distribution over continental shelves: a glimpse at two different river-influenced systems, the Cariaco Basin and the Amazon Shelf. Ph.D.

- Dissertation. University of South Florida, St. Petersburg, FL. USA.
- LORENZONI, L., R. THUNELL, C. BENITEZ-NELSON, D. HOLLANDER, N. MARTINEZ, E. TAPPA, R. VARELA, Y. ASTOR, F. E. MULLER-KARGER. 2009. The importance of subsurface nepheloid layers in transport and delivery of sediments to the Eastern Cariaco Basin, Venezuela. *Deep-Sea Research I* 56, 2249–2262.
- MÁRQUEZ, A., W. SENIOR, G. MARTÍNEZ, Y J. CASTAÑEDA. 2002. Environmental conditions of the waters of the Manzanares River, Cumaná-Sucre, Venezuela. *Boletín Instituto Oceanográfico de la Universidad de Oriente* 41(1–2): 15–24.
- MORRISON, J. Y W. NOWLIN. 1982. General distribution of water masses within the eastern Caribbean Sea during the winter of 1972 and fall of 1973. *Journal of Geophysical Research* 87: 4207–4229.
- MULLER-KARGER, F. E., Y R. APARICIO-CASTRO. 1994. Mesoscale Processes Affecting Phytoplankton Abundance in the Southern Caribbean Sea. *Continental Shelf Research* (14:2/3): 199–221.
- MULLER-KARGER, F. E., C. R. McCLAIN, P. L. RICHARDSON. 1988. The dispersal of the Amazon's water. *Nature* 333: 56–58.
- MULLER-KARGER, F. E., R. VARELA, R. THUNELL, M. SCRANTON, R. BOHRER, G. TAYLOR, J. CAPELO, Y. ASTOR, E. TAPPA, T. Y. HO, Y J. J. WALSH. 2001. Annual Cycle of Primary Production in the Cariaco Basin: Response to upwelling and implications for vertical export. *Journal of Geophysical Research* 106(C3): 4527–4542.
- MULLER-KARGER, F. E., R. VARELA, R. THUNELL, Y. ASTOR, H. ZHANG, Y C. HU. 2004. Processes of Coastal Upwelling and Carbon Flux in the Cariaco Basin. *Deep-Sea Research II Special Issue: Views of Ocean Processes from the Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) Mission: Volume 2* - Edited by D. A. Siegel, A. C. Thomas and J. Marra. Vol 51/10–11: 927–943.
- MULLER-KARGER, F., R. VARELA, R. C. THUNELL, M.I. SCRANTON, G. T. TAYLOR, Y. ASTOR, C. R. BENITEZ-NELSON, L. LORENZONI, E. TAPPA, M. A. GOÑI, D. RUEDA AND C. HU. 2010. CARIACO: a Time Series of primary production and vertical export in the Cariaco Basin. In: *Carbon and Nutrient Fluxes in Continental Margins: A Global Synthesis*. JGOFS Continental Margins Task Team (CMTT). Editors: Kon-Keo Liu, Larry Atkinson, Renato Quinones, Liana Talaue-McManus. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, New York. pp 454–463.
- MULLER-KARGER, F. E., J. P. SMITH, S. WERNER, R. CHEN, M. ROFFER, Y. LIU, B. MUHLING, D. LINDO-ATICHATI, J. LAMKIN, S. CERDEIRA-ESTRADA, D. B. ENFIELD. 2015. Natural variability of surface oceanographic conditions in the offshore Gulf of Mexico. *Progress in Oceanography*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2014.12.007>
- OKUDA, T., J. BENÍTEZ. 1974. Condiciones hidrográficas de las capas superiores en la Fosa de Cariaco y áreas adyacentes durante la época lluviosa. *Boletín Instituto Oceanográfico de la Universidad de Oriente* 13 (1–2): 147–162.
- OKUDA, T., B. R. GAMBOA Y A. J. GARCÍA. 1969. Seasonal variation of hydrographic conditions in the Cariaco Trench. *Boletín Instituto Oceanográfico de la Universidad de Oriente* 8(1–2): 21–27.
- PETERSON, L. C., Y G. H. HAUG. 2006. Variability in the mean latitude of the Atlantic Intertropical Convergence Zone as recorded by riverine input of sediments to the Cariaco Basin (Venezuela). *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 234(1): 97–113.
- PETERSON, L. C., J. T. OVERPECK, N. G. KIPP, Y J. IMBRIE. 1991. A high resolution Late Quaternary upwelling record from the anoxic Cariaco Basin, Venezuela. *Paleoceanography* 6(1): 99–119.
- REEBURGH, W. S. 1976. Methane consumption in Cariaco Trench waters and sediments. *Earth and Planetary Science Letters* 28(3): 337–344.

- RESTREPO, J. 2008. Applicability of LOICZ catchment coast continuum in a major Caribbean basin: The Magdalena River, Colombia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 77: 214–229.
- RICHARDS, F. Y R. VACCARO. 1956. The Cariaco Trench, an anaerobic basin in the Caribbean Sea. *Deep-Sea Research* 3: 214–228.
- RUEDA, D. 2012. Evaluation of Ekman upwelling in the southern Caribbean Sea. Ph.D. thesis, University of South Florida. 153 pp
- RUEDA-ROA, D., F. MULLER-KARGER. 2013. The Southern Caribbean Upwelling System: Sea surface temperature, wind forcing and chlorophyll concentration patterns *Deep-Sea Research I*, 78: 102–114.
- SCRANTON, M. I., F. L. SAYLES, M. P. BACON, Y P. G. BREWER 1987. Temporal changes in the hydrography and chemistry of the Cariaco Trench. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers* 34(5): 945–963.
- SCRANTON, M. I., G. TAYLOR, R. THUNELL, C. BENITEZ-NELSON, F. MULLER-KARGER, K. FANNING, L. LORENZONI, E. MONTES, R. VARELA, E Y. ASTOR. 2014. Interannual and Subdecadal variability in the nutrient geochemistry of the Cariaco basin. *Oceanography* Vol. 27, n° 1 March 2014.
- TAYLOR, G., F. MULLER-KARGER, R. THUNELL, M. SCRANTON, Y. ASTOR, R. VARELA, L. TROCCOLI, L. LORENZONI, K. FANNING, S. HANED, Y O. DOHERTY. 2012. Ecosystem responses in the southern Caribbean Sea to global climate change. *PNAS*. November 20, 2012. Vol. 109 n° 47: 19315–19320.
- THUNELL, R., R. VARELA, M. LLANO, J. COLLISTER, F. MULLER-KARGER Y R. BOHRER. 2000. Organic carbon fluxes, degradation, and accumulation in an anoxic basin: sediment trap results from the Cariaco Basin. *Limnology & Oceanography* 45(2), 300–308.
- THUNELL, R., C. BENITEZ-NELSON, R. VARELA, Y. ASTOR Y F. MULLER-KARGER. 2007. Particulate Organic Carbon Fluxes along Upwelling-Dominated Continental Margins: Rates and Mechanisms. *Global Biogeochemical Cycles*, 21, GB1022, doi:10.1029/2006GB002793. 13 pp.
- WALSH, J.J., D. A. DIETERLE, F. E. MULLER-KARGER, R. BOHRER, W. P. BISSETT, R. J. VARELA, R. APARICIO, H. T. HOCHMAN, C. SCHILLER, R. DIAZ, R. THUNELL, G. T. TAYLOR, M. I. SCRANTON, K. A. FANNING, Y E. T. PELZER. 1999. Simulation of carbon/nitrogen cycling during spring upwelling in the Cariaco Basin. *Journal of Geophysical Research* 104(C4): 7807.

Recibido: 7 octubre 2015

Aceptado: 18 septiembre 2016

Publicado en línea: 18 abril 2017

---

Laura Lorenzoni<sup>1</sup>, Ramón Varela<sup>2</sup>, Digna Rueda<sup>1</sup>, Frank Muller-Karger<sup>1</sup>, Jaimie Rojas<sup>2</sup>, Laurencia Guzmán<sup>2</sup>, Yrene Astor<sup>2</sup> y Enrique Montes<sup>1</sup>

<sup>1</sup> IMARS University of South Florida, College of Marine Science, St. Petersburg, Florida, USA.

<sup>2</sup> Estación de Investigaciones Marinas de Margarita, Fundación La Salle de Ciencias Naturales. Isla de Margarita, Venezuela.

laural@mail.usf.edu

ramon.varela@fundacionlasalle.org.ve