

Artículo

Síntesis de las tendencias de los parámetros oceanográficos y ópticos en la estación serie de tiempo CARIACO (enero 1996–diciembre 2013)

Yrene Astor, Laurencia Guzmán, Luis Troccoli, Laura Lorenzoni
y Frank Muller-Karger

Resumen. Se examinó la variabilidad y tendencia a largo plazo de distintos parámetros en las aguas superficiales de la estación serie de tiempo CARIACO, localizada en la Fosa de Cariaco, Venezuela, entre 1996–2013. La intensidad de la surgencia mostró cambios en el tiempo y una tendencia decreciente relacionada con una disminución de la velocidad del viento. Un aumento significativo de la temperatura superficial del mar de 0,9 °C se observó en 18 años de estudio. Por otra parte, se registró una tasa de descenso del pH de $0,0024 \pm 0,0003$ unidades de pH por año y un aumento en la concentración de carbono inorgánico disuelto de $1 \pm 0,29 \mu\text{mol kg}^{-1} \text{año}^{-1}$ en la estación, donde también se apreció un descenso significativo de la concentración de clorofila *a*, producción primaria y abundancia del fitoplancton, así como un cambio en el tipo de comunidades dominantes. Estos cambios produjeron a su vez diferentes características ópticas de las aguas marinas, lo que se expresó en una mayor incidencia de aguas con tonalidades con más frecuencia azules que verdes en los últimos años de la serie de tiempo.

Palabras clave. CO₂. Temperatura del mar. Acidificación. Óptica marina. Mar Caribe. Venezuela.

Summary of trends in oceanographic and optical parameters in the CARIACO time series station (January 1996 - December 2013)

Abstract. The variability of different parameters in surface waters at the CARIACO Time Series station, located in the Cariaco Basin, Venezuela, was examined between 1996 and 2013. The intensity of upwelling showed changes in time and a decreasing trend related to wind velocity. A significant increase in sea surface temperature of 0.9 °C was observed in 18 years of study. On the other hand, it was observed a descent rate of pH of 0.0024 ± 0.0003 units per year, and an increase in the concentration of dissolved inorganic carbon of $1 \pm 0.29 \mu\text{mol kg}^{-1} \text{yr}^{-1}$. In the CARIACO station, there has been also a significant decrease in the concentration of chlorophyll *a*, primary production, and abundance of phytoplankton, as well as a change in the type of dominant communities. These changes affected optical characteristics of marine waters, which were reflected in the incidence of water with more frequent blue tones than green in the last years of the time series.

Key words. CO₂. Seawater temperature. Acidification. Marine optics. Caribbean Sea. Venezuela.

Introducción

El valor de una serie de tiempo radica en que genera información para establecer líneas de base sobre las cuales se puede medir la variabilidad a diferentes escalas de tiempo (mensual, estacional, interanual, decenal) así como también percibir tendencias de variables oceanográficas a largo plazo. Estos registros sistemáticos son la mejor

manera de generar evidencia de cambios a largo plazo en parámetros ambientales, en comunidades biológicas, o en un ecosistema. Estas observaciones permiten entender si los cambios son producto del cambio climático o si son variaciones cíclicas, sea por su naturaleza o por algún efecto debido a actividades humanas (efectos antropogénicos).

Existen numerosas evidencias que indican que ciertos cambios se están produciendo en los océanos. La temperatura es un factor ambiental que representa el resultado de varios procesos termodinámicos, y que además afecta a otros procesos físicos, químicos y biológicos. Entre 1906–2005, el incremento promedio de la temperatura superficial del mar ha sido de 0,6 a 0,9 °C, duplicándose la tasa de aumento de la temperatura en los últimos 50 años (Riebeek 2010). De acuerdo al quinto informe especial elaborado por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) en el 2014 (IPCC 2014), las emisiones acumuladas de CO₂ antropogénico hacia la atmosfera estuvieron alrededor de 2040 ± 310 GtCO₂ entre 1750–2011, y un 40 % de estas emisiones permanecen aún en la atmosfera (880 ± 35 GtCO₂). Un 30 % del CO₂ antropogénico lo absorben los océanos lo cual tiene implicaciones significativas a largo plazo en la química de las aguas superficiales, manifestándose por ejemplo en la acidificación del mar (Bates *et al.* 2014). El pH de la superficie del océano ha descendido en 0,1 unidades con respecto a los valores de la era pre-industrial (1900's), y se espera que descienda en 0,2–0,3 unidades más para el año 2100 (Henson 2014). Las zonas de mínimo oxígeno (hipoxia), que representan un 8% del área total de los océanos, pueden sufrir una expansión en las próximas décadas como consecuencia del cambio climático (Paulmier y Ruiz-Pino 2009) lo que puede afectar la distribución y desarrollo de los organismos marinos. Estos ejemplos de cambios pueden tener relación con cambios climáticos y por tanto producir consecuencias fisiológicas en los organismos marinos, afectando el desarrollo, crecimiento y reproducción de los mismos (Doney *et al.* 2012).

Con el objetivo primordial de registrar la variabilidad temporal y las tendencias en el tiempo de las características de las aguas de la Fosa de Cariaco y sus sedimentos, el proyecto CARIACO lleva 20 años realizando estudios oceanográficos en aguas costeras venezolanas (Muller-Karger *et al.* 2013). La captación de muestras en la estación serie de tiempo CARIACO (10°30' N-64°40'O) comenzó en noviembre de 1995, y desde entonces se hacen mediciones mensuales en la columna de agua de manera continua con lo cual se estudia la hidrografía, composición de las comunidades planctónicas, producción primaria, actividad microbiana, aportes terrestres, flujo de sedimentos y ciclos biogeoquímicos. Las actividades que se realizan han permitido hacer un seguimiento en el tiempo de los cambios que ocurren en las condiciones del mar en las costas venezolanas al sureste del mar Caribe y establecer los efectos que puedan tener estas variaciones sobre los recursos naturales, como por ejemplo el pesquero.

Numerosos trabajos con diferentes líneas y enfoques de investigación han sido publicados a partir de los datos generados por la serie de tiempo CARIACO. Estos trabajos pueden descargarse de las páginas web <http://cariacodev.cbm.usb.ve/> y

<http://imars.usf.edu/view/biblio/803738/year>. La estación CARIACO se encuentra ubicada en una zona de surgencia en la costa oriental de Venezuela entre cabo Codera y la península de Araya (Figura 1) donde recibe la influencia de los vientos alisios que provienen de una dirección predominante este-noreste durante los meses de enero a mayo (Astor *et al.* 2003). El área está conformada por dos depresiones tectónicas que poseen una profundidad aproximada de 1400 m, las cuales están situadas al este y oeste de un umbral submarino de 900 m de profundidad. El límite norte de la cuenca esta bordeado por un banco submarino menor de 150 m que marca su separación del mar Caribe y restringe el intercambio de agua. Estas características topográficas causan un aislamiento parcial de las aguas de la cuenca por debajo de ~140 m de profundidad. Este aislamiento, junto con la elevada productividad primaria estimulada por la surgencia, conduce al desarrollo de condiciones subóxicas (O_2 disuelto $< 5 \mu M$) por debajo de los ~200 m y de condiciones anaeróbicas por debajo de los 350 m de profundidad dentro de la cuenca.

En este trabajo se presenta un resumen de las características superficiales resultantes de casi dos décadas de mediciones en la estación serie de tiempo CARIACO. Estas características presentan tendencias significativas en el tiempo, así como una gran variabilidad interanual y estacional. Los resultados incluyen variables físicas, químicas y biológicas.

Métodos

La información que se presenta fue recolectada mensualmente a bordo del B/O Hermano Ginés (Fundación La Salle de Ciencias Naturales, Venezuela) y representan 18 años de mediciones (1996–2013). La metodología usada para medir temperatura, salinidad, sistema CO_2 -carbonato, absorción de partículas y clorofila *a* se detalla en Astor *et al.* (2013a). Un resumen de la metodología empleada se muestra en la Tabla 1. Las observaciones que se obtienen durante los muestreos mensuales en la estación CARIACO están disponibles en las páginas web <http://cariacodev.cbm.usb.ve>, <http://cdiac.ornl.gov/oceans/Moorings/Cariaco>, <http://www.imars.usf.edu/cariaco>, <http://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.805397?format=html>, y <http://www.bco-dmo.org/project/2047>. Además, los datos se envían regularmente al National Centers for Environmental Information (NCEI), anteriormente el National Oceanographic Data Center (NODC), y al sistema SeaWiFS Bio-optical Archive and Storage System (SeaBASS) de la NASA. Los datos de temperatura y del sistema CO_2 -carbonatos presentados representan el promedio de los primeros 7 m de profundidad de manera de minimizar el efecto del calentamiento diario. Los datos de clorofila *a* y producción primaria representan datos integrados hasta los 100 m.

Los valores de pH (pH de la concentración total del ion de hidrógeno, pH_T) y alcalinidad total (AT) necesarios para calcular los diversos parámetros del sistema CO_2 -carbonato se obtuvieron entre enero de 1996 y diciembre del 2000, y desde marzo del 2002 hasta diciembre del 2013. Tanto el pH como la alcalinidad total fueron

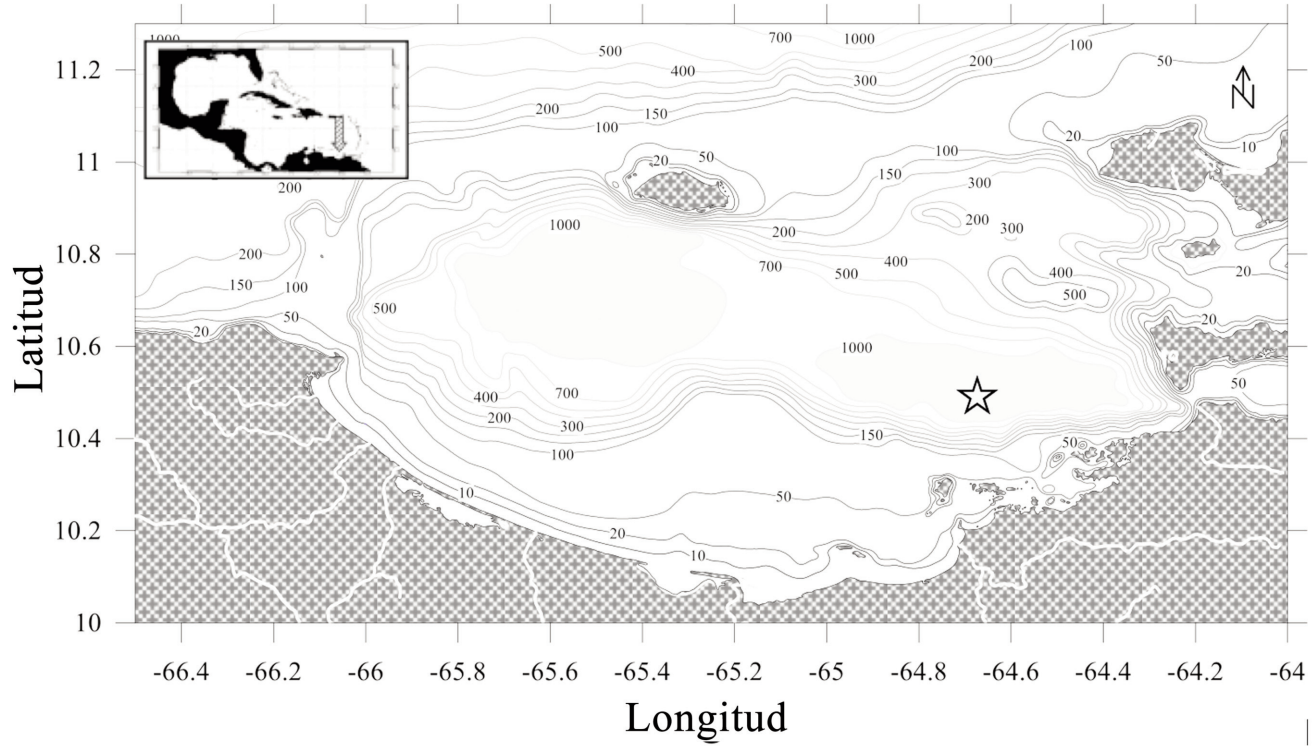


Figura 1. Área de estudio: Fosa de Cariaco ubicada en la plataforma continental de Venezuela, suroriente del Mar Caribe.

medidos por métodos espectrofotométricos, tal como se detalla en Astor *et al.* (2013a), empleando un espectrómetro marca Ocean Optics modelo SD-1000. La precisión de la medida de AT es de $4 \mu\text{mol kg}^{-1}$ y de pH de 0,003 unidades de pH. Los datos de pH se ajustaron a la temperatura ambiental ya que la medición de pH se realiza a $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Se emplearon soluciones estándares de referencia certificadas para validar el análisis de AT. Estas soluciones son suministradas por el Dr. A. G. Dickson del Scripps Institute of Oceanography (La Jolla, California). La desviación estándar obtenida entre la media de alcalinidad de tres estándares y el valor certificado de la solución de referencia fue de $2 \mu\text{mol kg}^{-1}$.

Tabla 1. Métodos empleados para los parámetros utilizados en este trabajo en la estación CARIACO.

Parámetro	Método	Referencias
Temperatura, salinidad, presión, oxígeno disuelto, fluorescencia y atenuación de la luz	Electrométrico, perfilador CTD	Sensores SeaBird: SBE-3F, SBE-4c, SBE-29, SBE-43, WETLabs ECO-FLRTD, WETLabs C-star
pH	Espectrofotométrico	Clayton y Byrne (1993)
Alcalinidad total	Espectrofotométrico	Breland y Byrne (1993)
Clorofila <i>a</i>	Fluorométrico	Holm-Hansen <i>et al.</i> (1965)
Absorción de partículas	Espectrofotométrico	Kishino <i>et al.</i> (1985)
Reflectancia	Espectro-radiómetro	Photoresearch, modelos PR650 y PR655

El carbono inorgánico total (TCO_2) y la presión parcial del CO_2 ($p\text{CO}_{2\text{mar}}$) se calcularon usando el programa CO2SYS (Lewis y Wallace, 1998), empleando las constantes de disociación del ácido carbónico de Millero *et al.* (1973) con las modificaciones de Dickson y Millero (1987), y las constantes de equilibrio de Millero (1995). La precisión de las medidas de TCO_2 and $p\text{CO}_{2\text{mar}}$ se estimaron a través de 1000 simulaciones de Monte Carlo empleando el promedio y las desviaciones estándares de pH y AT. La incertidumbre asociada con TCO_2 fue de $2 \mu\text{mol kg}^{-1}$ y para $p\text{CO}_{2\text{mar}}$ de $4 \mu\text{atm}$.

Las mediciones de clorofila *a* se hicieron siguiendo el método por fluorescencia de Holm-Hansen *et al.* (1965) con modificaciones indicadas en Astor *et al.* (2013a) y Falkowski y Kiefer (1985) empleando un fluorómetro Turner Designs modelo 10-AU-005. Las muestras de fitoplancton se captaron junto con las hidrográficas. Estas muestras se preservaron con formalina al 4 % neutralizada con tetraborato de sodio y se analizaron con un microscopio invertido, las mismas se usaron para el conteo de células y el cómputo de densidades. La cuantificación se realizó mediante cámaras móviles de 100 mL por el método Utermöhl (Hasle 1978) con un tiempo de sedimentación de 48 horas.

El índice de surgencia costera ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ por 100 m de línea de costa) se estimó según la metodología de Bakun (1973) y Schwing *et al.* (1996):

$$M = \tau_x / f \quad (1)$$

donde,

M es el transporte meridional Ekman que resulta de la tensión del componente zonal del viento en la superficie del agua (τ_x), y f es el parámetro Coriolis. Debido a que el viento zonal en CARIACO es negativo (es decir, se dirige de este a oeste), el signo del componente costa afuera del transporte Ekman se modificó para que el transporte Ekman refleje un transporte vertical positivo. Los datos de viento necesarios para calcular la tensión del componente zonal del viento para el periodo 1996–2013 se obtuvieron de dos estaciones meteorológicas: una localizada a $10^\circ 54' \text{ N}$ y $64^\circ 06' \text{ O}$ en Punta de Piedras y la otra a $10^\circ 54' \text{ N}$ y $63^\circ 08' \text{ O}$ en el aeropuerto internacional de Porlamar. Ambas estaciones están ubicadas en la isla de Margarita, Venezuela.

Las mediciones básicas de las características ópticas de las aguas marinas se limitaron a los siguientes parámetros: el espectro de reflectancia del mar, que es un índice de la cantidad de radiación solar que sale de la superficie del mar relativa a la radiación solar entrante (reflectancia de sensores remotos [$R_{rs}(\lambda)$]); y los espectros de absorción total de la luz [$a_T(\lambda)$] debido a la propia molécula del agua [$a_w(\lambda)$], a los compuestos disueltos que modifican el color [$a_g(\lambda)$], al fitoplancton [$a_{ph}(\lambda)$], y al material detrítico en suspensión [$a_d(\lambda)$] (Bricaud y Stramski, 1990).

La reflectancia [$R_{rs}(\lambda)$] en cada crucero se calculó empleando los registros de un espectro-radiómetro (Spectrascan) de PhotoResearch. Entre 1996 y 2008 se empleó el modelo PR650, y en el periodo 2008 y 2013 el modelo PR655. Con este equipo se midió la radiancia del cielo [$L_s(\lambda)$] y la emitida por la superficie del mar [$L_o(\lambda)$] en $\mu\text{Wcm}^{-2}\text{nm}^{-1}\text{sr}^{-1}$, así como la irradiancia del cielo [$E_d(\lambda)$] en $\text{Wcm}^{-2}\text{nm}^{-1}$. Tres mediciones se realizaron apuntando al agua a un ángulo de 30° respecto a la vertical, y una hacia el cielo con un lente macro MS-75, a un ángulo de 30° respecto a la vertical. La irradiancia [$E_d(\lambda)$] fue captada a través del accesorio Cos-Collector CR-650. La información obtenida con el radiómetro se procesó para calcular la [$R_{rs}(\lambda)$] expresada en unidades relativas (sr^{-1}), la cual indica la fracción de luz que recibe la superficie del mar que regresa al cielo en determinado ángulo de medición, de acuerdo a la ecuación (2):

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{L_w(\lambda)}{E_d(\lambda)} \quad (2)$$

donde,

$E_d(\lambda)$ es la irradiancia descendente que entra al mar y $L_w(\lambda)$ es la radiancia que sale del agua, definida por:

$$L_w(\lambda) = L_o(\lambda) - (L_s(\lambda) * 0,02) \quad (3)$$

Donde a su vez, $L_o(\lambda)$ es la radiancia que sale de la superficie del mar, $L_s(\lambda)$ es la radiancia proveniente del cielo, y la constante de Fresnel (0,02) es el porcentaje de radiación solar que se refleja de la interfase aire-agua (Kirk, 1983) y que representa el color del cielo que ‘contamina’ la medición de la radiancia emergente del mar.

Las muestras para determinar la absorción de luz debida a las partículas totales [$a_p(\lambda)$] fueron analizadas como se describe en Lorenzoni *et al.* (2011) a partir de la técnica del filtro húmedo basada en Kishino *et al.* (1985), modificada según Mitchell y Kiefer (1988), utilizando un espectro-radiómetro de Photo Research modelo PR 655 y un espectrofotómetro marca Jenway modelo 6505. La descripción detallada de esta metodología también se encuentra en Astor *et al.* (2013a).

Tratamientos estadísticos: la tendencia de los datos y la variabilidad estacional en las aguas costeras puede enmascarar los cambios de amplitud y frecuencia baja, que duren más de un año. Para poder interpretar y evaluar más claramente las tendencias a largo plazo se procedió a remover el ciclo anual (quitar el efecto de la estacionalidad) siguiendo las recomendaciones de Bates (2007). El ciclo anual fue removido estadísticamente al substraer de las observaciones mensuales la media de 18 años de mediciones de cada parámetro excepto en el índice de surgencia y la velocidad del viento. Para el cálculo de tendencias de pH, TCO₂ y pCO₂ se excluyeron los datos del periodo 2001–2002 debido a que fallas en el equipo impidieron recolectar datos confiables de estos parámetros. La tasa de cambio de todos los parámetros se obtuvo a través de una regresión lineal en función del tiempo (años). Para el análisis del color del mar, una matriz de similaridad con distancias Euclidianas se realizó para agrupar los años más similares según el color dominante de sus aguas. A esta matriz se le aplicaron análisis multivariados no-paramétricos utilizando las técnicas descritas por Clarke y Warwick (2001). Estas técnicas se encuentran en el paquete de programas *Primer v6* y *Permanova + add-on* (Anderson *et al.* 2008)

Resultados y discusión

Parámetros físicos, químicos y biológicos

Algunas variables en la Fosa de Cariaco muestran tendencias significativas después de 18 años de mediciones (Tabla 2); sin embargo, es importante destacar que una serie de tiempo < 20 años es un periodo relativamente breve para poder establecer si los cambios observados corresponden a una oscilación natural a largo plazo o son el resultado de una tendencia global. La brevedad de la serie de tiempo impide establecer con certeza si estas tendencias son en efecto un cambio unidireccional inducido por cambios climáticos, si es parte de un ciclo más largo que el periodo analizado, o si se trata de una condición errática de la naturaleza superpuesta a otros ciclos o cambios.

La velocidad del viento influye de manera marcada sobre la intensidad de la surgencia. Vientos más débiles durante el periodo de surgencia conllevan a un afloramiento de aguas más someras, y por ende más calientes, por lo que afecta directamente la temperatura superficial del mar (TSM). Estos cambios reflejaron un aumento de 0,9 °C entre enero de 1996 y diciembre de 2013 ($R^2 = 0,05$; $p < 0,001$), lo que representa un incremento de $0,05 \pm 0,01$ °C por año (Figura 2a). La intensidad de la surgencia

(Figura 2b) y la velocidad del viento (Figura 2c) disminuyeron paulatinamente mostrando una tasa de cambio anual de $-32,83 \pm 7,36 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ por 100 m de línea de costa ($R^2 = 0,09$; $p < 0,001$) y $-0,08 \pm 0,02 \text{ m s}^{-1}$ ($R^2 = 0,11$; $p < 0,001$) respectivamente. Se observó un descenso en el índice de surgencia y en la velocidad del viento durante el periodo de estudio con respecto a los datos de la estación CARIACO analizados en Astor *et al.* (2013b).

Tabla 2 Resumen de los valores estadísticos de las tendencias de los parámetros analizados en el lapso de 18 años registrados en la estación CARIACO.

Parámetro	Pendiente	Intersección estándar	Error	n	R ²	valor-p
T	0,05	-72,24	0,01	211	0,05	< 0,001
pH	-0,0024	12,835	0,0003	164	0,26	< 0,001
nTCO ₂	1,13	-178,54	0,26	160	0,10	< 0,001
pCO ₂	2,27	-4145	0,29	170	0,26	< 0,001
Clorofila <i>a</i>	-1,30	2579	0,4	204	0,05	< 0,001
Producción primaria	-0,04	73,69	0,01	195	0,06	< 0,001
Índice de surgencia	-32,83	67080	7,36	211	0,09	< 0,001
Velocidad del viento	-0,08	158,1	0,02	211	0,11	< 0,001
<i>a_{ph}</i> (432-452)	-0,0010	1,947	0,0004	181	0,04	< 0,01
[R _{TS} (680-692/544-564)]	-0,005	9,883	0,0012	136	0,11	< 0,01

Los cambios de pH, unidos a otros cambios en la química del carbonato oceánico, pueden afectar los principales ciclos biogeoquímicos. También pueden tener efectos directos o indirectos sobre la estructura y funcionamiento de algunos ecosistemas marinos. Las zonas de surgencia, como la costa nororiental venezolana, son ambientes que naturalmente son más ácidos debido al afloramiento de aguas profundas ricas en CO₂ que llegan a la superficie; por otra parte, la absorción de CO₂ antropogénico por parte de las aguas superficiales adicionalmente incrementa la extensión de tal acidificación. En consecuencia, se espera que estas áreas experimenten cambios observables como resultado de los efectos de la acidificación del mar (Feely *et al.* 2008). Con los datos de la serie de tiempo CARIACO se ha logrado establecer una línea de base del pH de las aguas superficiales. La tasa de descenso de pH es de $-0,0024 \pm 0,0003$ unidades de pH por año (Figura 3a; $R^2 = 0,26$; $p < 0,001$). Este descenso es particularmente significativo ya que se ha mantenido en el tiempo a pesar de la disminución en la intensidad de la surgencia que conlleva al afloramiento de aguas más someras con pH más elevado. Esto implica que la contribución de la surgencia a la disminución del pH en la superficie es menor, y el descenso de pH se podría atribuir a un aumento en la concentración de carbono inorgánico disuelto (TCO₂) de aguas superficiales inducido por la absorción de CO₂ antropogénico. Black *et al.* (2011) mostró que un registro detallado de la composición isotópica de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) de foraminíferos planctónicos obtenidos de muestras de núcleos y de trampas de sedimento de la Fosa de Cariaco revelaban que los cambios observados en el $\delta^{13}\text{C}$ marino han sido impulsados por el aumento del CO₂ antropogénico en los últimos 300 años. Las mediciones de pH del proyecto CARIACO son importantes ya que es uno de los primeros y únicos registros que actualmente monitorean el proceso de acidificación en aguas costeras tropicales en la región.

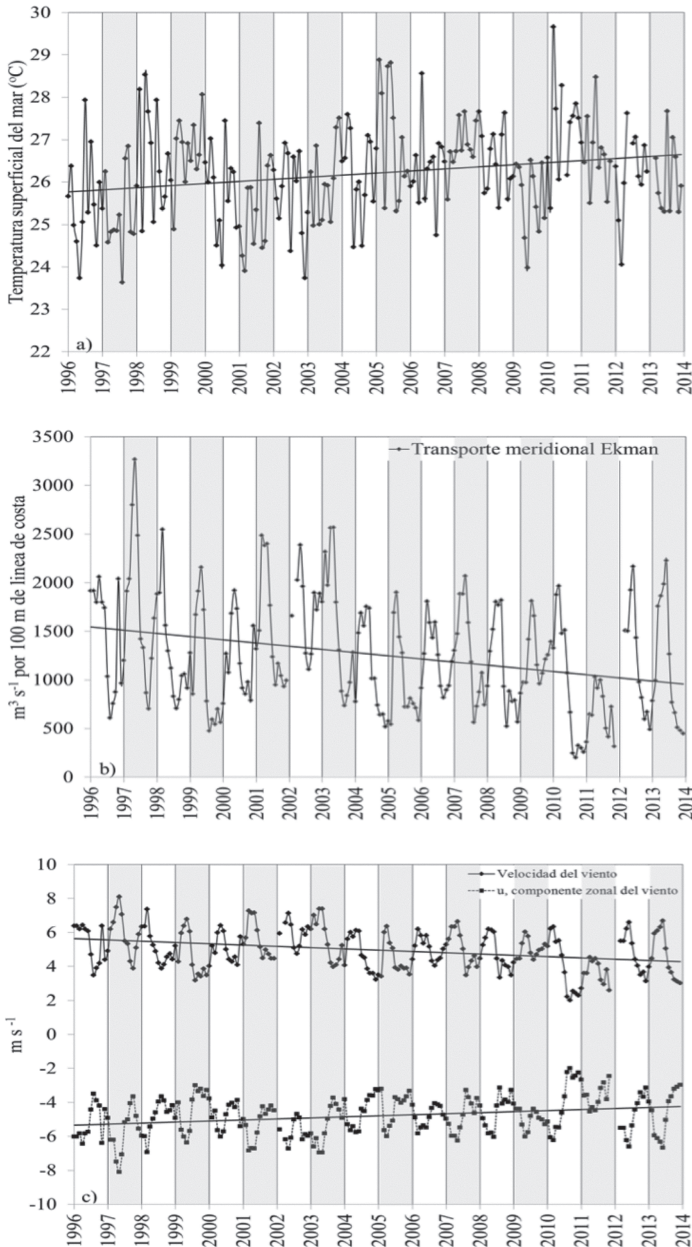


Figura 2. Serie de tiempo de observaciones mensuales de a) temperatura superficial del mar (TSM, °C), b) índice de surgencia ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ por 100 m de línea de costa), c) velocidad del viento y componente zonal del viento, u (m s^{-1}) en la estación serie de tiempo CARIACO desde enero de 1996 hasta diciembre del 2013. A los datos de TSM se le removió la estacionalidad no así a los datos del índice de surgencia y de vientos. Las líneas de tendencia se indican con la recta continua en los gráficos.

Al normalizar el CO_2 a una salinidad constante ($n\text{TCO}_2 = 36.8 * \text{TCO}_2 / \text{salinidad}$, donde 36,8 es la salinidad media superficial) para minimizar el efecto de la evaporación y las precipitaciones, los datos reflejan un incremento de $1,13 \pm 0,26 \mu\text{mol kg}^{-1}$ por año ($R^2 = 0,10$; $p < 0,001$). Esto equivale a un incremento de $19 \mu\text{mol kg}^{-1}$ en 18 años de mediciones (Figura 3b). Los datos de $p\text{CO}_2$ muestran también una tendencia positiva significativa con una tasa de $2,27 \pm 0,29 \mu\text{atm}$ por año ($R^2 = 0,26$; $p < 0,001$). La $p\text{CO}_2$ se ha incrementado en $41 \mu\text{atm}$, un cambio de 8 % durante los últimos 18 años (Figura 3c). Si se remueve el efecto de la temperatura en las mediciones de $p\text{CO}_2$ (datos no se muestran, ver Astor *et al.*, 2013b) se observa una tasa menor de aumento lo que significa que el incremento de la temperatura en el agua tiene un efecto significativo en este parámetro en esta zona tropical.

En la estación CARIACO se ha observado también un descenso significativo en la concentración de clorofila *a*, producción primaria y abundancia de fitoplancton ($p < 0,001$) desde 1996 hasta 2013. La Figura 4a muestra como la concentración de clorofila *a* en la columna de agua disminuyó $-1,3 \pm 0,4 \text{ mg m}^{-2}$ por año ($R^2 = 0,05$, $p < 0,001$), y la producción primaria (Figura 4b) descendió a una tasa media anual de $-0,04 \pm 0,01 \text{ gC m}^{-2}$ por año ($R^2 = 0,06$, $p < 0,001$).

Entre 1996–1997, la abundancia promedio del fitoplancton en la columna integrada (Figura 5) superó las 200 Cel mL^{-1} , para disminuir entre 1998 y 2000 a valores por debajo de 100 Cel mL^{-1} . Entre 2000–2004, el fitoplancton presentó una recuperación con promedios cercanos a 100 Cel mL^{-1} , y a partir del 2005, la abundancia disminuyó notablemente, con promedios inferiores a las 50 Cel mL^{-1} con excepción del año 2007 y 2012.

Tanto Taylor *et al.* (2012) como Pinckney *et al.* (2015) indicaron que la abundancia del microfitoplancton ($> 20 \mu\text{m}$) en esta región no solo ha disminuido en los últimos años sino que también ha ocurrido un cambio en el tipo de comunidades dominantes y en el tamaño promedio de las células. La tendencia en el tiempo observada fue un descenso total del microfitoplancton, principalmente diatomeas de tamaño relativamente grande, y un aumento de organismos fitoplanctónicos que comprenden grupos taxonómicos más pequeños (nanoplancton $< 20 \mu\text{m}$). Esto se observó tanto en época de surgencia como de no surgencia. Organismos como Coccolitofóridos, Cryptofíceas, Cyanofíceas y varios tipos de flagelados incrementaron su presencia en la región. La diversidad del fitoplancton aumento en un 14 % (Pinckney *et al.*, 2015) debido al incremento relativo de pequeñas taxa. La mayor biomasa del fitoplancton se ubicó a profundidades mayores de 55 m durante más meses después de haber permanecido cerca de las aguas superficiales con más frecuencia al comienzo del estudio de la serie de tiempo.

Las corrientes superficiales en la estación CARIACO son corrientes de arrastre impulsadas por los vientos alisios. Estas corrientes fluyen de este a oeste la mayor parte del tiempo. De acuerdo a Alvera-Azcárate *et al.* (2009), estas corrientes superficiales muestran un cambio de dirección (hacia el este) solo en enero y septiembre-octubre, y la surgencia se observa con distintos niveles de intensidad la mayor parte del año

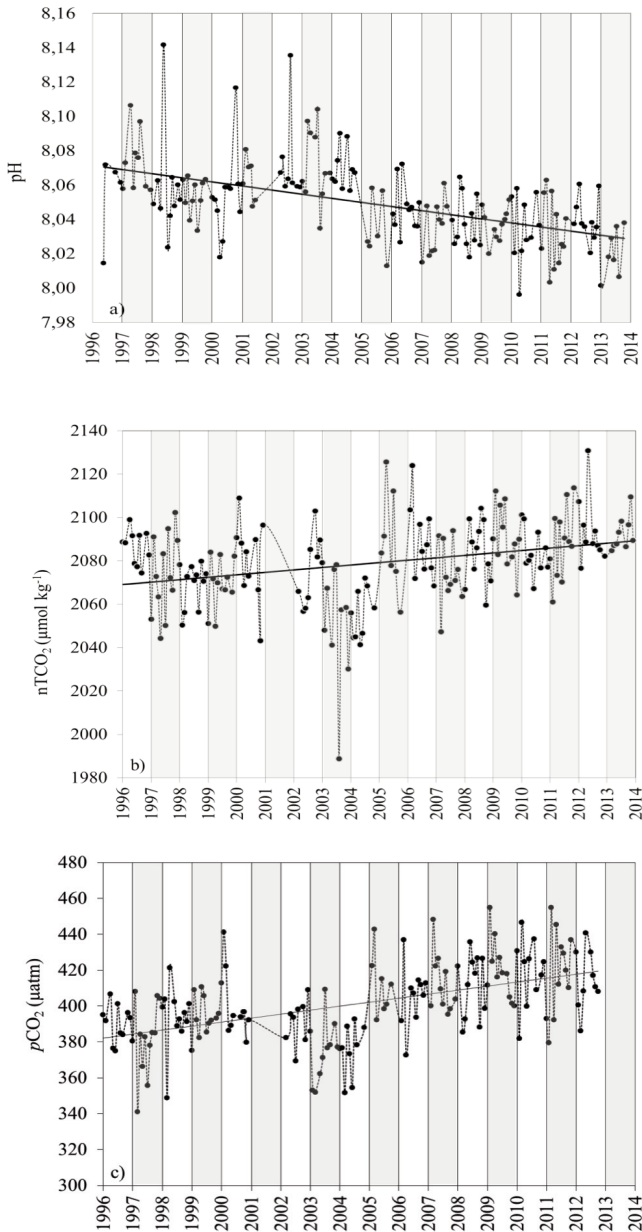


Figura 3. Serie de tiempo de observaciones mensuales de a) pH, b) CO₂ total normalizado a una salinidad constante de 36,8 (nTCO₂, μmol kg⁻¹) y c) presión parcial del CO₂ superficial (pCO₂mar, μatm) en la estación serie de tiempo CARIACO desde enero de 1996 hasta diciembre de 2013. Las líneas punteadas conectan las mediciones a las que se le removió la estacionalidad. Las líneas de tendencia se indican con la recta continua en los gráficos.

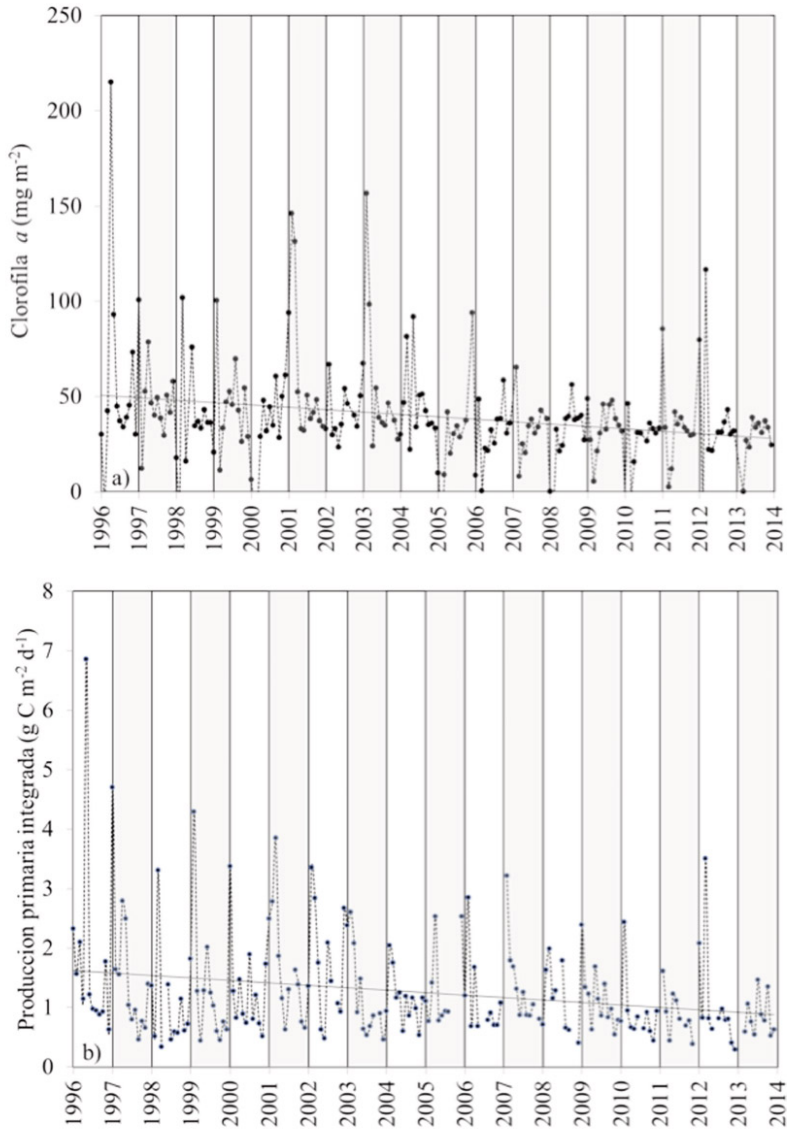


Figura 4. Serie de tiempo de observaciones mensuales de a) clorofila *a* integrada (mg m^{-2}) y b) producción primaria integrada ($\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$) de 0-100 m en la estación serie de tiempo CARIACO desde enero de 1996 hasta diciembre de 2013. A los datos se le removió la estacionalidad. La línea de tendencia es indicada por la línea continua negra.

excepto en el mes de noviembre. En las aguas más profundas donde el efecto del viento no es importante, la distribución vertical de las corrientes presenta un movimiento anticiclónico a los 50 m de profundidad, y un movimiento ciclónico en las aguas más profundas, lo cual es consistente durante todo el año (Alvera-Azcárate *et al.* 2009). Por lo tanto, se descarta la posibilidad que los cambios observados en la estación CARIACO, tanto físicos como biológicos, puedan deberse a un cambio en la circulación o en los patrones de corrientes.

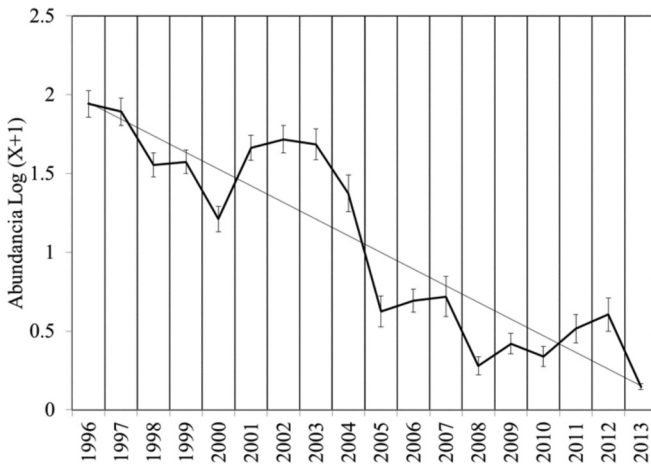


Figura 5. Abundancia promedio del número de organismos del fitoplancton en la estación serie de tiempo CARIACO desde 1996 hasta 2013. Expresada en el Log (X+1); X= org./mL

Propiedades bio-ópticas

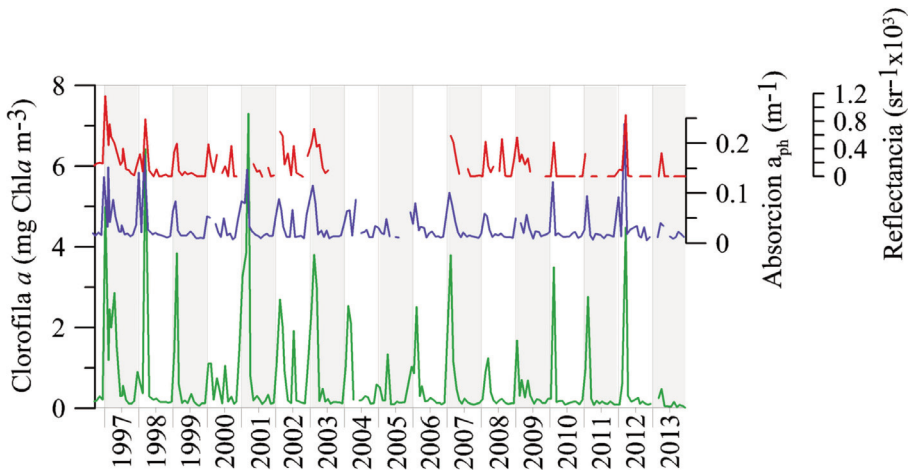
La disminución en la productividad del fitoplancton y en la concentración de clorofila *a* entre 1996 y 2013 expresan un cambio de estado significativo en el ecosistema marino. Este cambio probablemente ha sido impulsado por una disminución de la surgencia, el calentamiento de las aguas superficiales, y el aumento de la estratificación (Taylor *et al.* 2012). A lo largo de 18 años de muestreo se ha encontrado que la biomasa fitoplanctónica es el parámetro que tiene mayor efecto sobre los cambios en las propiedades ópticas del agua en CARIACO. La clorofila *a* es el pigmento más influyente en el color del mar, el cual tiene su máximo de absorción de la luz en la región del azul-morado entre los 430 y 450 nm, con un segundo máximo en el rojo entre los 660 y 680 nm. Igualmente el mismo refleja en la banda del verde-amarillo entre 565 y 570 nm. El fitoplancton también emite energía por fluorescencia en el rojo alrededor de los 680 nm (Morel y Prieur 1977, Jeffrey *et al.* 1997). Debido a esto, el mar pierde intensidad en el azul y se aprecia un incremento en el verde en las épocas de biomasa alta. Un tono verde oscuro (oliva) se alcanza cuando los niveles de biomasa son altos ($[Chla] > 2 \mu\text{gL}^{-1}$), como resultado de la mezcla del verde reflejado y el rojo emitido por la fluorescencia de la clorofila.

En la figura 6a se muestra la variación a nivel superficial de la clorofila a , la absorción de luz debida al fitoplancton en el azul-morado [a_{ph} (432–452)] y la reflectancia en el rojo [R_{rs} (680–692)]. Tanto los coeficientes de a_{ph} (432–452) como la R_{rs} (680–692) variaron en función de la concentración de clorofila a ($R^2= 0,76$ y $R^2= 0,48$, respectivamente; $p < 0,001$). Basándose en la fuerte relación que tiene el a_{ph} (432–452) con la concentración de clorofila a es de esperar una tendencia negativa del a_{ph} (432–452) con el tiempo. En efecto, luego de eliminar la estacionalidad se observó una disminución en el a_{ph} (432–452) de $-0,016 \text{ m}^{-1}$ en 18 años de estudio ($R^2= 0,04$; $p < 0,01$) con una tasa anual de $-0,001 \text{ m}^{-1}$ (Tabla 2). Esta tendencia en los coeficientes de a_{ph} (432–452) y otros cambios en las propiedades bio-ópticas de las aguas de CARIACO son consecuencia de la disminución de la biomasa y la concentración de clorofila a superficial.

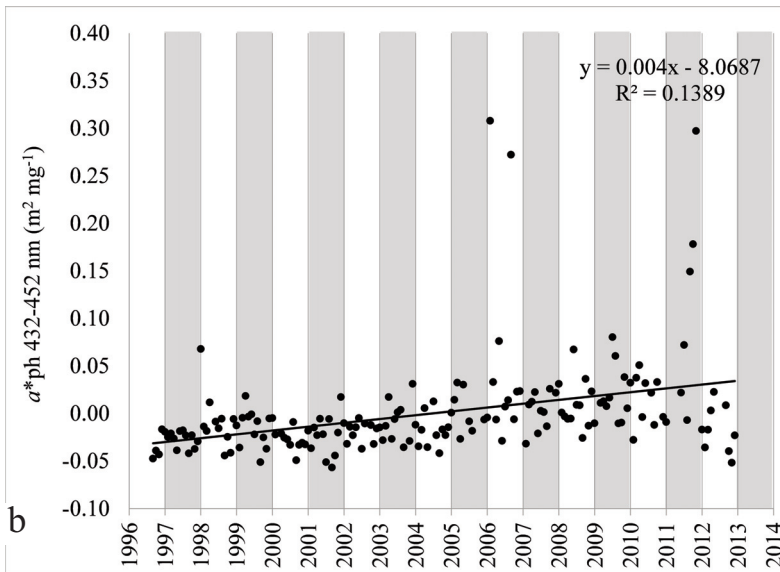
El coeficiente de absorción específica del fitoplancton (a^*_{ph}) permite evaluar la fracción de talla dominante dentro de una población, gracias al efecto de empaquetamiento de los pigmentos dentro de las células. En este sentido cerca de los 440 nm, coeficientes elevados indican dominancia de células pequeñas (picofitoplancton), mientras los coeficientes más bajos revelan células de mayor tamaño (microfitoplancton). Se calculó el coeficiente de absorción específica del fitoplancton a^*_{ph} (432–452 nm) normalizando con la clorofila a y los feopigmentos (Ciotti *et al.* 2002) y, luego de remover la estacionalidad, se observó una pendiente ascendente de $0,004 \pm 0,0001 \text{ m}^2 \text{ mg}^{-1}$ por año (Figura 6b, $R^2= 0,14$; $p < 0,001$). Esto sugiere que en CARIACO el microfitoplancton está siendo remplazado por células de menor tamaño, lo cual es una respuesta a los cambios en la hidrodinámica del sistema atribuidos a la disminución en la intensidad de los vientos durante los últimos años (Taylor *et al.* 2012). En este sentido, los cambios observados en la dinámica de la surgencia y el aumento de la estabilidad de las aguas pudieron tener efectos sobre el establecimiento y dominancia de especies de fitoplancton de menor tamaño en la estación.

La variación de la relación entre la reflectancia del rojo [R_{rs} (680–692)] y la del verde-amarillo [R_{rs} (544–564)] es de gran utilidad para caracterizar bio-ópticamente el agua de mar. El aumento de la reflectancia en la banda roja es en parte causada por la fluorescencia de la clorofila a bajo estimulación de la luz solar. Por otra parte en aguas marinas, el color verde-amarillo no varía mucho aunque la concentración de fitoplancton cambie significativamente. En CARIACO, la relación [R_{rs} (680-692/544-564)] resultó mayor en condiciones de elevada biomasa (0,25–0,40), y disminuyó (0–0,10) cuando las aguas fueron más pobres y claras (Figura 7). Al eliminar la estacionalidad a esta relación entre bandas se encontró que la relación ha disminuido significativamente $-0,005 \pm 0,0012 \text{ unidades año}^{-1}$ ($R^2 = 0,11$; $p < 0,01$, Tabla 2), lo que sugiere en términos prácticos que en CARIACO se están registrando con menor frecuencia aguas con emisiones en el rojo y en el verde, y por tanto se están presentando con más frecuencia aguas azules.

Una forma de verificar estos cambios en el color del mar fue mediante una comparación interanual de la frecuencia de aparición mensual de espectros de R_{rs} que típicamente indican aguas de color azul, menos azul y más rojizo (el ojo humano no nota estos cambios en el rojo fácilmente). La figura 8a muestra un ejemplo de cada uno de estos



a



b

Figura 6. Serie de tiempo a nivel superficial de a) la concentración de clorofila *a* ($\text{mg Chl } a \text{ m}^{-3}$) a 1 m de profundidad, del coeficiente de absorción de luz (m^{-1}) debida al fitoplancton en la banda del azul-morado (432–452 nm) y la reflectancia de sensores remotos (R_{TS} , $\text{sr}^{-1} \times 10^3$) en la banda de los rojos (680–692 nm), b) variación del coeficiente de absorción específica del fitoplancton ($\text{m}^2 \text{ mg}^{-1}$).

tipos de espectros medidos en la estación CARIACO. La comparación estadística se realizó con una ordenación MDS elaborada con el programa *Primer v6* y *Permanova + add on* donde se agruparon los años más similares según la cantidad de espectros de cada tipo (Figura 8b), encontrándose que a partir del 2008 no se observaron espectros verdes ni verde-oliva.

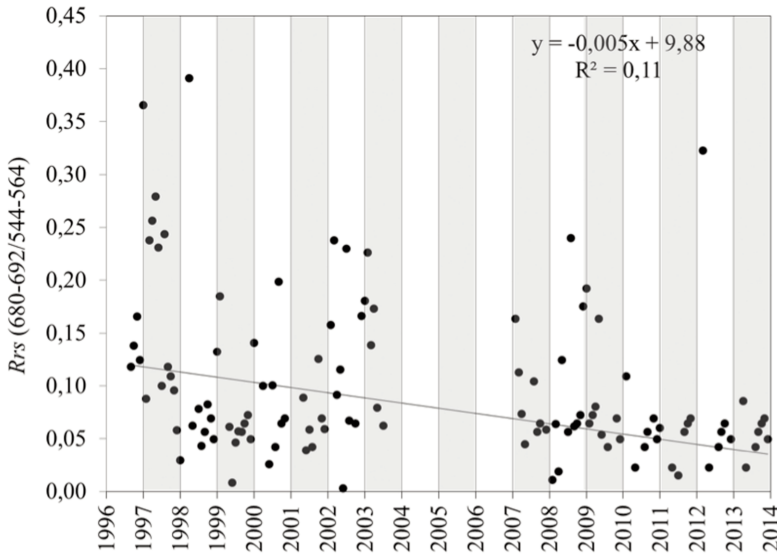


Figura 7. Serie de tiempo de la relación de la R_{rs} entre las bandas 680–692 nm y 544–564 nm en la estación serie de tiempo CARIACO desde de 1996 hasta diciembre del 2013.

La tabla 3 clasifica los años según el color del agua prevaleciente. Después del año 2000, el 2001 fue el único año asociado al verde oliva. La surgencia del 2001 fue particularmente fuerte lo que permitió que se observaran tres meses con este tipo de espectro. Los años que presentaron aguas de color verde fueron: 1997, 2002, 2003, 2004 y 2007. Durante estos años, la presencia de este color permaneció por un periodo mayor de tres meses. El año 2002 aparece aislado en la figura 8b por tener apenas tres meses con espectros de color azul, lo cual puede ser un artificio causado por espectros faltantes durante los meses de relajación. Los años con aguas más azules correspondientes a aguas de baja productividad fueron 1998, 1999, 2008, 2010 y 2011. En este último grupo también debería entrar el año 2005, el cual fue el año con la surgencia más débil de la serie de tiempo según los datos de clorofila *a* y temperatura, lo que condujo a una menor presencia de biomasa fitoplanctónica. Sin embargo, no se tienen suficientes datos de óptica para este año por lo que no se incluyó en el análisis. De la misma manera, el año 2013 fue excluido del análisis debido a que no fue posible realizar mediciones durante enero y febrero, meses en los cuales suelen ocurrir los eventos de surgencia intensa. Los años característicos de aguas verde-azules fueron

2000, 2006, 2009 y 2012, donde la surgencia no fue lo suficientemente intensa para que el mar alcanzara espectros de color rojizo, observándose un azul-verdoso. Aunque en el 2012 se registró un espectro de color rojizo, este se dio en un solo mes, y en general este año se asoció mejor con espectros verde-azules.

Tabla 3. Clasificación de los años según el color del mar prevaleciente en la estación CARIACO.

Año	Color
2001	Verde-oliva
1997, 2002, 2003, 2004, 2007	Verde
2000, 2006, 2009, 2012	Verde-azul
1998, 1999, 2008, 2010, 2011	Azul
2002	Azul (posible artificio)
2005, 2013	No hay suficientes datos

Conclusión

El valor de los estudios de series de tiempo radica en la habilidad de separar cambios que se presentan a frecuencias altas (horas, días y meses) de los cambios que estén ocurriendo a través de períodos largos y que puedan ser debidos a una variabilidad asociada con cambios en el clima. La medición de varias variables no solo permite entender los efectos que puedan tener sobre la física, química y biología de las aguas, sino también la interacción entre los mismos. Para detectar estos cambios es importante la constancia y el cuidado que se preste a las mediciones para mantener una calidad alta en los datos de lo contrario, es imposible saber si los cambios observados son simplemente errores en las observaciones o si son cambios reales en la naturaleza. Estos cambios en el ambiente y ecosistemas, como los observados con el pH, temperatura, o índices de la biomasa, pueden pasar inadvertidos o ser interpretados erróneamente en mediciones a corto plazo, pero resultan evidentes cuando mediciones de alta calidad científica se extienden por un periodo prolongado. Cuanto más prolongada es la serie de tiempo más robustas son las conclusiones a las que se puedan llegar.

Un incremento de 0,9 °C de la temperatura superficial del mar en la estación CARIACO se observó en 18 años de mediciones, lo cual fue consecuencia de un debilitamiento en la surgencia causada por una disminución de la intensidad de los vientos alisios. Igualmente, una disminución del pH en las aguas superficiales se registró en la estación CARIACO, el cual es independiente de la surgencia y posiblemente esté vinculado a un aumento en la concentración de carbono inorgánico disuelto inducido por la absorción de mayor cantidad de CO₂ antropogénico. Un incremento en la concentración de nTCO₂, no relacionado con el aporte de aguas profundas, y también de pCO₂ se midió en las aguas superficiales de la estación. Este último está directamente relacionado con el incremento de la temperatura del mar. Hay evidencia que estos cambios atmosféricos e hidrográficos inducen a una disminución de la cantidad de clorofila *a* promedio y una menor producción primaria en estas

aguas, acompañado de un cambio en la composición y una menor abundancia de las poblaciones de organismos del fitoplancton. Estos cambios producen a su vez diferentes características ópticas de las aguas marinas, lo que se refleja en la incidencia de aguas con tonalidades verdes y azules.

Entre los años 2005 y 2012, la surgencia fue más débil incidiendo en un menor aporte de nutrientes a la superficie; por lo tanto, las aguas estuvieron más cálidas y la abundancia del fitoplancton disminuyó considerablemente lo que probablemente pudo contribuir al colapso de la pesca de sardina (*Sardinella aurita*) en la región. Según

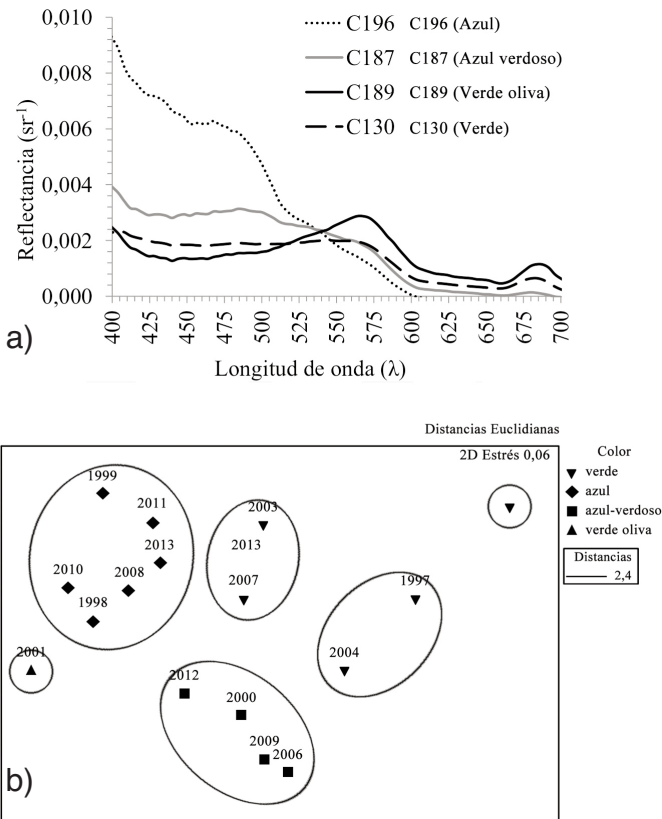


Figura 8. a) Espectros de reflectancia (R_{rs}) observados con mayor frecuencia en la estación serie de tiempo CARIACO desde 1996 hasta 2013 (Cruceros: C196, dominancia de la banda azul, línea negra punteada; C187, espectro del mar azul verdoso, línea continua gris; C130, dominancia del color verde, línea discontinua; y C189, verde oliva, línea continua negra). b) Ordenación MDS de los años según la frecuencia anual de aparición de los cuatro espectros de R_{rs} más comunes en la estación serie de tiempo CARIACO (estrés = 0,07) a partir de una matriz de similitud de distancias euclidianas. La superposición de un dendrograma muestra la agrupación de los años.

Gómez-Gaspar *et al.* (2014), la captura nacional de sardina varió entre 150.000 y 200.000 toneladas en el 2004 hasta valores por debajo de las 35.000 toneladas entre el 2010–2012. Aunque este descenso en la captura pudo ser el resultado de varios factores y no necesariamente debido únicamente a los cambios que se produjeron en las condiciones del agua, es importante considerar la influencia que esto último pudo tener en una disminución del recurso. Factores naturales o antropogénicos (como la sobrepesca), o la sinergia de ambos, pudieron contribuir con este colapso.

Agradecimiento. Este trabajo se apoya en la base de datos del proyecto CARIACO, que desde finales de 1995 ha generado información de forma periódica de varios parámetros oceanográficos. Esto ha sido posible gracias a la disponibilidad del B/O Hermano Ginés (de Fundación La Salle de Ciencias Naturales) y a su experta tripulación. Además, numerosas personas profesionales y estudiantes han participado en la toma y análisis de muestras, y en el desarrollo y continuidad del proyecto a lo largo de 18 años. Una mención especial en esta oportunidad al Dr. Joaquín Buitrago quién fue director de EDIMAR en los primeros años de arranque del proyecto, y que comprendió la trascendencia del mismo y a la vez estimuló la confianza en las personas que lo iban a llevar adelante. El proyecto además fue en buena parte apoyado financieramente por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICIT, Venezuela, 96280221), el Fondo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (FONACIT, Venezuela, 2000001702 y 2011000353), y LOCTI (CON-EDIMAR 23914); y por National Science Foundation (NSF, USA, OCE- 0752139, OCE-9216626, OCE-9729284, OCE-9401537, OCE-9729697, OCE-9415790, OCE-9711318, OCE-0326268 y OCE. 0963028), la National Aeronautics and Space Administration (NASA, USA, NAG5-6448, NAS5-97128); y por el Inter-American Institute for Global Change Research (IAI-CRN3094).

Bibliografía.

- ALVERA-AZCÁRATE, A. BARTH, Y R. H. WEISBERG. 2009. A nested model of the Cariaco Basin (Venezuela): description of the basin's interior hydrography and interactions with the open ocean. *Ocean Dynamics* 59: 97–120.
- ANDERSON, M. J.; R. N. GORLEY; K. R. CLARKE. 2008. *Permanova+ for Primer: Guide to Software and Statistical Methods*. Primer-E, Plymouth, UK, 214 pgs.
- ASTOR, Y., L. LORENZONI, Y M. SCRANTON, editores. 2013a. *Manual de métodos para el análisis de parámetros oceanográficos en la estación serie de tiempo CARIACO*. Colección cuadernos FLASA, Serie: Ciencia y Tecnología, Fundación La Salle de Ciencias Naturales, nº 12, 178 pp.
- ASTOR, Y. M., L. LORENZONI, R. THUNELL, R. VARELA, F. MULLER-KARGER, L. TROCCOLI, G. T. TAYLOR, M. I. SCRANTON, E. TAPPA, Y D. RUEDA. 2013b. Interannual variability in sea surface temperature and fCO_2 changes in the Cariaco Basin. *Deep-Sea Research II* 93: 33–43.
- ASTOR, Y. M., F. MULLER-KARGER, Y M. SCRANTON. 2003. Seasonal and interannual variation in the hydrography of the Cariaco Basin: implications for basin ventilation. *Continental Shelf Research* 23(1): 125–144.
- BAKUN, A. 1973. Coastal upwelling indices, west coast of North America, 1946–71. U.S. Department of Commerce, NOAA Technical Report NMFS SSRF-671, 103pp.

- BATES, N. R., Y. M. ASTOR, M. J. CHURCH, K. CURRIE, J. E. DORE, M. GONZÁLEZ-DÁVILA, L. LORENZONI, F. MULLER-KARGER, J. OLAFSSON, Y J. M. SANTANA-CASIANO. 2014. A time-series view of changing ocean chemistry due to ocean uptake of anthropogenic CO₂ and ocean acidification. *Oceanography* 27(1):126–141, <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2014.16>.
- BATES, N. R. 2007. Interannual variability of the oceanic CO₂ sink in the subtropical gyre of the North Atlantic Ocean over the last 2 decades. *Journal Geophysical Research*. 12 (C9): 1978–2012.
- BLACK, D., R. THUNELL, K. WEJNERT, E Y. ASTOR. 2011. Carbon isotope composition of Caribbean Sea surface waters: Response to the uptake of anthropogenic CO₂. *Geophysical Research Letters* 38: L16609.
- BRELAND II, J. A. Y R. H. BYRNE. 1993. Spectrophotometric procedures for determination of seawater alkalinity using bromocresol green. *Deep-Sea Research I* 40(3): 629–641.
- BRICAUD, A. Y D. STRAMSKI. 1990. Spectral absorption coefficients of living phytoplankton and non-algal biogenous matter: a comparison between Peru upwelling area and the Sargasso Sea. *Limnology and Oceanography* 35(3): 562–582.
- CLARKE, K. R. Y R. M. WARWICK. 2001. Changes in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation. 2nd edition. PRIMER-E, Plymouth, UK: Plymouth Marine Laboratories, 176 pp.
- CLAYTON, T. D. Y R. H. BYRNE. 1993. Spectrophotometric seawater pH measurements: total hydrogen ion concentration scale calibration of m-cresol purple and at sea results. *Deep-Sea Research I* 40(10): 2115–2129.
- DICKSON, A. G. Y F. J. MILLERO. 1987. A comparison of the equilibrium constants for the dissociation of carbonic acid in seawater media. *Deep-Sea Research* 34: 1733–1743.
- DONEY, S.C., M. RUCKELSHAUS, J. EMMETT DUFFY, J. P. BARRY, F. CHAN, CH. A. ENGLISH, H. M. GALINDO, J. M. GREBMEIER, A. B. HOLLOWED, N. KNOWLTON, J. POLOVINA, N. N. RABALAIS, W. J. SYDEMAN, Y L.D. TALLEY. 2012. Climate Change Impacts on Marine Ecosystems. *Annual Review Marine Science* 4: 11–37.
- FALKOWSKI, P. Y D. A. KIEFER. 1985. Chlorophyll fluorescence in phytoplankton: relationship to photosynthesis and biomass. *Journal Plankton Research* 7: 715–731.
- FEELY, R. A., C. L. SABINE, J. M. HERNANDEZ-AYON, D. IANSON, Y B. HALES. 2008. Evidence for upwelling of corrosive “acidified” water onto the Continental Shelf. *Science* 320(5882): 1490–1492.
- GÓMEZ-GASPAR, A., E. MATA, Y O. GÓMEZ. 2014. Crisis de la pesca de sardina en Venezuela: variación de la biomasa del fitoplancton en el este de Margarita, una década de estudio (2003-2012). *Boletín Instituto Oceanográfico Venezuela* 53(1): 25–36.
- HASLE, S. 1978. The inverted microscope method. En Sournia 1978. Phytoplankton manual. SCOR-Unesco. 337 pp.
- HOLM-HANSEN, O., C. J. LORENZEN, R. W. HOLMES, Y J. D. H. STRICKLAND. 1965. Fluorometric determination of chlorophyll. *Journal du Conseil permanent International pour l'Exploration de la Mer* 30: 3-15.
- KIRK, J. 1983. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge University Press. Cambridge: 380 pp.
- IPCC. 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- KISHINO, M., M. TAKAHASHI, N. OKAMI, Y S. ICHIMURA. 1985. Estimation of the spectral absorption coefficients of phytoplankton in the sea. *Bulletin of Marine Science* 37(2): 634-642.
- JEFFREY, S., R. MANTOURA, Y S. WRIGHT. 1997. Phytoplankton pigments in oceanography. Monographs on Oceanographic Methodology 10 UNESCO, Paris. 661 pp.

- LEWIS, E. Y D. WALLACE. 1998. Program developed for CO₂ system calculations. Report ORNL/CDIAC-105, Carbon Dioxide Information and Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee, USA.
- LORENZONI, L., C. HU, R., VARELA, G. ARIAS, L. GUZMAN, Y F. MULLER-KARGER. 2011. Bio-optical characteristics of Cariaco Basin (Caribbean Sea) waters. *Continental Shelf Research* 31: 582–593.
- MEHRBACH, C., C. H. CULBERSON, J. E. HAWLEY, Y R. M. PYTKOWICZ. 1973. Measurement of the apparent dissociation constants of carbonic acid in seawater at atmospheric pressure. *Limnology and Oceanography* 18: 897–907.
- MILLERO, F. 1995. Thermodynamics of the carbon dioxide system in the oceans. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59(4): 661–677.
- MITCHELL, G. Y D. A. KIEFER. 1988. Chlorophyll a specific absorption and fluorescence excitation spectra for light-limited phytoplankton. *Deep-Sea Research* 35(5): 639–663.
- MOREL, A. Y L. PRIEUR. 1977. Analysis of variations in ocean color. *Limnology and Oceanography* 22(4):709–722.
- MULLER-KARGER, F., G. T. TAYLOR, Y. ASTOR, R. C. THUNELL, M. I. SCRANTON, R. VARELA, L. TROCCOLI GHINAGLIA, L. LORENZONI, E. MONTES, K. A. FANNING, Y C. BENITEZ-NELSON. 2013. From affiliated project: The CARIACO Basin Ocean Time-Series. Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone International Project Office, issue 1: 5–17.
- HENSON, S. A. 2014. Slow science: the value of long ocean biogeochemistry records. Philosophical. Transaction Royal Society. A 372: 20130334. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2013.0334>.
- PAULMIER, A. Y D. RUIZ-PINO. 2009. Oxygen minimum zones (OMZ) in the modern ocean. *Progress in Oceanography* 80(3–4): 113–128.
- PINCKNEY, J. L., C. R. BENITEZ-NELSON, R. C. THUNELL, F. MULLER-KARGER, L. LORENZONI, L. TROCCOLI, Y R. VARELA. 2015. Phytoplankton community structure and depth distribution changes in the Cariaco Basin between 1996 and 2010. *Deep-Sea Research I* 101: 27–37.
- RIEBEEK, H. 2010. Global warming. Earth Observatory [Online]. Disponible en <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/GlobalWarming/> [Acceso 24 diciembre 2014].
- SCHWING, F., M. O'FARRELL, J. M. STEGER, Y K. BALTZ. 1996. Coastal-upwelling indices West coast of North America 1946-95. U.S. Dep. Commer., NOAA Tech. Mem. NMFS SWFSC-23, 32 pp.
- TAYLOR, G. T., F. MULLER-KARGER, R. C. THUNELL, M. I. SCRANTON, Y. ASTOR, R. VARELA, L. TROCCOLI GHINAGLIA, L. LORENZONI, K. A. FANNING, S. HAMEED, Y O. DOHERTY. 2012. Ecosystem Response to Climatic Changes in the Southern Caribbean Sea. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109(47): 19315–19320.

Recibido: 29 junio 2015

Aceptado: 19 mayo 2016

Publicado en línea: 18 abril 2017

Yrene Astor¹, Laurencia Guzmán¹, Luis Troccoli², Laura Lorenzoni³, Frank Muller-Karger³

¹ Estación de Investigaciones Marinas de Margarita, Fundación La Salle de Ciencias Naturales. Punta de Piedras. Isla de Margarita. Venezuela. (yrene.astor@fundacionlasalle.org.ve)

² ECAM Universidad de Oriente. Boca de Rio. Isla de Margarita. Venezuela.

³ University of South Florida, College of Marine Science, St. Petersburg, Florida, USA.