

Variabilidad de la pendiente espectral de la materia orgánica disuelta cromofórica (CDOM) en la estación de monitoreo multianual Antares, Cartagena.

Variability of spectral slope of the chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in the multi-annual monitoring Antares Station, Cartagena

Recibido: 2019-11-30 / Aceptado: 2020-02-10

Stella Patricia Betancur-Turizo; Joaquín Pablo Rivero Hernández

CITAR COMO:

Betancur-Turizo, S.; Rivero, J. (2020). Variabilidad de la pendiente espectral de la materia orgánica disuelta cromofórica (CDOM) en la estación de monitoreo multianual Antares, Cartagena. *Bol. Cient. CIOH*, 39 (2): 3-15. ISSN impreso 0120-0542 e ISSN en línea 2215-9045. DOI 10.26640/22159045.2020.506

RESUMEN

El estudio de la pendiente espectral de la materia orgánica disuelta cromofórica (SCDOM) en aguas ópticamente complejas es importante para comprender su papel en los ciclos biogeoquímicos y la atenuación de la luz en la columna de agua, dada la dependencia espectral que tiene con el coeficiente de absorción de la materia orgánica disuelta cromofórica ($a_{CDOM}(\lambda)$), y a que provee información sobre la naturaleza de los cromóforos del mismo. En este estudio se documentó la variabilidad temporal de SCDOM en una estación fija de monitoreo bimensual ubicada a $10^{\circ} 24' 32''$ N y $75^{\circ} 45' 34''$ W, a 10 km de la costa oeste de la Isla Tierrabomba en Cartagena, Colombia. Este análisis se basó en la evaluación de las diferencias entre los coeficientes de absorción del $a_{CDOM}(\lambda)$ y la SCDOM estimadas en seis periodos de monitoreo desarrollados entre marzo de 2019 y febrero de 2020. Los valores obtenidos son los primeros en reportarse para la región y buscan identificar si la estación es sensible a la presencia de masas de agua representativas de procesos zonales y estacionales que pudiesen afectar la naturaleza y origen del CDOM medido. Como resultados preliminares, se encontró una capa superficial (<20 m) con un dinamismo asociado a la estacionalidad de la zona de estudio, con valores de la SCDOM bajas asociados a la época seca, y pendientes altas asociadas a la época de lluvias, con máximos registrados para el 8 de junio de 2019. Para la masas de agua profunda (>40 m) la variabilidad del $a_{CDOM}(\lambda)$ y de la SCDOM se asociaron a actividad biológica de la zona. En particular, este trabajo contribuye al conocimiento de las propiedades ópticas y su contribución hacia la definición de las pendientes espectrales del CDOM en la región.

PALABRAS CLAVES: Cartagena, CDOM, variabilidad temporal, propiedades ópticas, aguas oceánicas, aguas costeras.

ABSTRACT

The study of the spectral slope of Chromophoric Dissolved Organic Matter (SCDOM) in optically complex waters is important to understand its role in biogeochemical cycles and the attenuation of light in the water column, given the spectral dependence it has with the coefficient of absorption of Chromophoric Dissolved Organic Matter ($a_{CDOM}(\lambda)$) since it provides information on the nature of the chromophores thereof. In this study we document the temporal variability of SCDOM in a fixed bi-monthly monitoring station located at $10^{\circ} 24' 32''$ N and $75^{\circ} 45' 34''$ W, 10 km from the west coast of Tierra Bomba Island in Cartagena, Colombia. This analysis was based on the evaluation of the differences between absorption coefficients of the $a_{CDOM}(\lambda)$ and the SCDOM estimated in six monitoring periods developed between March 2019 and February 2020. The values obtained are the first to be reported for the region and seek to identify if the Antares station sensitive to the presence of water bodies representative of zonal and seasonal processes that could affect the nature and origin of the measured CDOM. As preliminary results, a surface layer (<20 m) was found with a dynamism associated with the seasonality of the study area, with low SCDOM values associated with the dry season, and high slopes associated with the rainy season, with maximums registered for 8 June, 2019. For the deep water bodies (> 40 m) the variability of $a_{CDOM}(\lambda)$ and SCDOM were associated with biological activity in the area. In particular, this work contributes to the knowledge of the optical properties and its contribution towards the definition of spectral slopes of CDOM for the region.

KEYWORDS: Cartagena, CDOM, temporal variability, optical properties, coastal waters, oceanic waters,

¹ Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH). Correo electrónico: sepabe77@gmail.com

² Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH). Correo electrónico: jrivero@dimar.mil.co

INTRODUCCIÓN

La materia orgánica disuelta cromofórica (CDOM, por sus siglas en inglés), en el pasado denominada *gelbstoff*, sustancias amarillas, gilvin o sustancias húmicas, acotó este nuevo nombre porque esta materia no solo absorbe la luz visible sino también la luz ultravioleta UV-A (longitudes de onda entre 315 nm a 400 nm) y UV-B (longitudes de onda entre 280 nm y 315 nm), que también son parte del espectro solar de superficie (Blough y Del Vecchio, 2002). El CDOM representa solo una porción del total de materia orgánica disuelta (DOM, por sus siglas en inglés) y se le considera el principal determinante de las propiedades ópticas en las zonas costeras, ríos y lagos (Blough y Del Vecchio, 2002; Nelson y Siegel, 2002; Siegel, Maritorea, Nelson, Hansell y Lorenzi-Kayser, 2002), lo que ha motivado a que sea ampliamente estudiado en las últimas décadas (Betancur-Turizo *et al.*, 2017; Blough y Del Vecchio, 2002; Nelson y Siegel, 2002). Sus magnitudes y formas espectrales dependen de su origen, el cual puede ser derivado de la descomposición de las plantas leñosas en ambientes terrestres (alóctono) o derivado de la descomposición de las algas y la vegetación acuática dentro de un cuerpo de agua (autóctono) (Brezonik, Olmanson, Finlay y Bauer, 2015).

Se reconoce entonces que la variabilidad del CDOM no solo obedece a su magnitud, sino también a su origen, el cual ha podido determinarse gracias al parámetro S , que representa la pendiente espectral calculada a partir del ajuste del espectro de absorción del $a_{CDOM}(\lambda)$ a una forma exponencial ($y = Ae^{(-S*\lambda)}$), cuyo valor está directamente relacionado con la "naturaleza" de los cromóforos del CDOM, es decir, la fuente de esta materia orgánica; lo que indica que puede variar en función del tipo de agua, por ejemplo, para aguas de océano abierto se han reportado valores entre 0.025 nm^{-1} y 0.030 nm^{-1} (Blough y Del Vecchio, 2002), para

aguas costeras europeas se reportó un valor de $0.0176 \pm 0.0020 \text{ nm}^{-1}$ (Babin *et al.*, 2003), mientras que para lagos oligotróficos a eutróficos se reportaron valores entre 0.0107 nm^{-1} y 0.020 nm^{-1} (Effler *et al.*, 2010; Riddick *et al.*, 2015).

En el presente estudio se evaluó la variabilidad temporal de la pendiente espectral del CDOM (SCDOM) de acuerdo con seis seguimientos realizados entre marzo de 2019 y febrero de 2020. La magnitud de la SCDOM fue estimada en la vertical y entre periodos de monitoreo, su cálculo se hizo mediante el ajuste del espectro por el modelo exponencial simple ($y = Ae^{(-S*\lambda)}$) en el intervalo de longitud de onda entre 350 nm a 500 nm, para finalmente asociar dichos valores con las condiciones oceanográficas que caracterizaron el cuerpo de agua en cada periodo de monitoreo.

ÁREA DE ESTUDIO

La estación Antares tiene una profundidad promedio de 150 m y está localizada en las coordenadas $10^{\circ} 24' 32'' \text{ N}$ y $75^{\circ} 45' 34'' \text{ W}$, a 10 km de la costa este de la isla Tierrabomba en Cartagena, Colombia (Fig. 1). Dos periodos climáticos han sido identificados en la zona: estación seca y de lluvias (Maza, Voulgaris y Subrahmanyam, 2016). La estación seca se extiende desde diciembre hasta abril, se caracteriza por bajas precipitaciones y el predominio de los vientos Alisios que soplan desde el norte-noreste. La estación de lluvias abarca el período de mayo a noviembre, se caracteriza por presentar precipitaciones con valores promedio de 125.7 mm; los vientos son relativamente débiles y se dirigen de norte a sur hasta agosto. Más tarde los vientos giran hacia el suroeste, especialmente durante agosto-noviembre. Esta estacionalidad climática es típica de la parte sur del mar Caribe y es causada por las oscilaciones de la zona de convergencia intertropical (ZCIT).

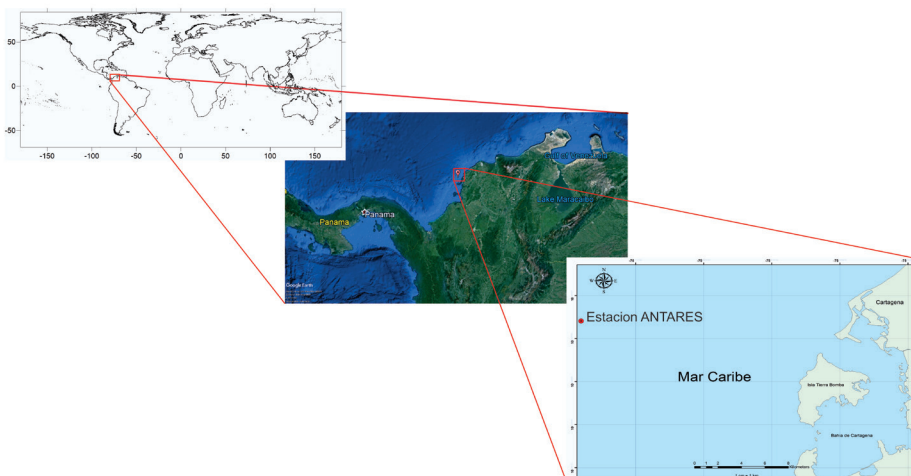


Figura 1. Ubicación geográfica de la estación Antares, Cartagena.

La temperatura del agua es uniforme a lo largo de la columna durante la mayor parte de la estación seca, con diferencias de hasta 1.5 °C (diferencia promedio de 0.75 °C) observadas en el período de mayo a agosto (temporada de lluvias) (Maza *et al.*, 2016). La zona está influenciada estacionalmente por la pluma del río Magdalena, ubicado aproximadamente a 100 km al norte de la estación de Antares (Maza *et al.*, 2016).

METODOLOGÍA

Toma de datos en campo

El programa de monitoreo de la estación Antares, Cartagena, comenzó en el año 2009, pero la toma de muestras para la determinación del coeficiente de absorción de la materia orgánica disuelta cromofórica ($a_{CDOM}(\lambda)$) inició en marzo de 2019. Los datos físicos y bio-ópticos fueron colectados durante seis periodos de monitoreo desarrollados entre marzo de 2019 y febrero de 2020. En la Tabla 1 se indican las fechas de cada monitoreo, el periodo de tiempo y las profundidades en las cuales se colectaron las muestras.

En cada monitoreo se hizo un lanzamiento de un CDT SeaBird para el registro *in situ* de los datos de temperatura, conductividad y presión, con el fin de describir la estructura vertical de la columna de agua en cada periodo. Las muestras de agua fueron tomadas utilizando botellas Niskin de 5 L para la determinación del coeficiente de absorción de luz de la materia orgánica disuelta cromofórica (CDOM), tomando directamente de la botella una muestra de agua utilizando frascos de vidrio ámbar previamente lavados, según protocolo de Mitchell, Kahru, Wieland, Stramska y Mueller (2002). Estas se almacenaron en refrigeración (4 °C a 8 °C) hasta su análisis en laboratorio.

Procesamiento de datos en el laboratorio

El coeficiente de absorción de luz es una propiedad óptica inherente que puede ser descrita en términos de la contribución aditiva de sus componentes (Mitchell *et al.*, 2002):

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_p(\lambda) + a_{CDOM}(\lambda)$$

Donde, $a_w(\lambda)$ se refiere a la absorción del agua, $a_p(\lambda)$ a la absorción del material particulado que

Tabla 1. Periodos de monitoreo a la estación Antares.

Fecha [AAAA/MM/DD]	Intervalo de tiempo toma de muestras [HH:MM]	Profundidad de colecta de las muestras [m]
2019-03-06	09:10 a 10:45	5
2019-05-09	09:10 a 10:50	20
2019-06-08	10:07 a 11:00	40
2019-08-28	10:20 a 10:45	50
2019-11-13	09:40 a 11:00	60
2020-02-26	08:00 a 09:55	80

a su vez se descompone en fitoplancton ($a_{ph}(\lambda)$) y detrito ($a_d(\lambda)$), y a la absorción por el CDOM ($a_{CDOM}(\lambda)$), que es el componente de absorción objeto del presente artículo.

Las muestras de agua de mar almacenadas para determinación del CDOM fueron filtradas

en un sistema de filtración negativo, usando filtros Nuclepore de 0.2 μm de tamaño de poro y 25 mm de diámetro. Previo a la filtración, los filtros son sumergidos en HCl al 10 % y lavados con agua Milli-Q, según metodología descrita por Mitchell *et al.* (2002). Los datos se midieron con un espectrofotómetro Varian

Cary 100, en donde se realizó un barrido de la densidad óptica de las muestras entre 250 nm y 800 nm utilizando una cubeta cilíndrica de 10 cm de longitud, a una resolución de 1 nm. La determinación del $a_{CDOM}(\lambda)$ se realizó mediante la siguiente ecuación (Mitchell *et al.*, 2002):

$$a_{CDOM}(\lambda) = \left(\frac{2.303}{l}\right)((OD_s(\lambda) - OD_{null}) - (OD_b(\lambda) - OD_{null}))$$

Donde, l es la longitud de paso de la celda (10 cm), OD_s es la densidad óptica de la muestra, OD_b es la densidad óptica del blanco y OD_{null} es la densidad óptica del punto nulo (600 nm).

Los valores de la pendiente espectral del espectro de $a_{CDOM}(\lambda)$ (S_{CDOM}) pueden ser afectados por el modelo e intervalo del espectro escogido para su cálculo (Twardowski, Boss, Sullivan y Donaghay, 2004). Por esta razón, el ajuste aplicado utilizó el modelo exponencial simple ($y = Ae^{(-Sx)}$) para una porción del espectro de absorción del CDOM entre 350 nm y 500 nm.

Al aplicar el modelo de ajuste antes mencionado, a cada uno de los espectros de absorción del CDOM, se obtuvo el valor de la exponente S , es decir la S_{CDOM} . El ajuste del modelo fue valorado a partir del error cuadrático medio o Root Mean Square Error (RMSE, por sus siglas en inglés) y R^2 . La S_{CDOM} define la dependencia espectral del $a_{CDOM}(\lambda)$ y provee información sobre la naturaleza de los cromóforos del CDOM (Blough y Del Vecchio, 2002).

Procesamiento de datos oceanográficos

La información correspondiente a campos de altura y dirección de ola presentada en este artículo, fue editada a partir de productos gráficos e informes presentados por la Central de pronósticos del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH) (<https://www.cioh.org.co/meteorologia/PreCaAltamar.php>).

Los datos registrados por el CTD-SeaBird con sensor de fluorescencia fueron procesados de acuerdo con el software del equipo. La temperatura se expresa en grados Celsius ($^{\circ}C$), los valores de fluorescencia fueron transformados a concentraciones de clorofila a en mg/m^3 , la

salinidad en unidades prácticas de salinidad (PSU) y la densidad en kilogramo por metro cúbico ($\sigma-t$, kg/m^3).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Condiciones meteorológicas y oceanográficas de la zona de estudio

Condiciones meteorológicas: las condiciones meteorológicas que caracterizaron los seis periodos de monitoreo permiten identificar al 6 de marzo de 2019 y 26 de febrero de 2020 como los representativos de la época seca, mientras que el 9 de mayo, 8 de junio, 28 de agosto y 13 de noviembre de 2019 fueron representativos de la época de lluvias.

Así entonces, las condiciones de la época seca pudieron ser valoradas a partir de dos periodos de monitoreo, uno en 2019 y otro en 2020. Particularmente en marzo de 2019 se observó un predominio de vientos fuertes de dirección noreste, con velocidades de 15 a 25 nudos y una altura de oleaje entre 1.5 m y 3.0 m, con alturas entre 2.2 m y 3.0 m asociadas particularmente unos kilómetros al norte del área de estudio (Fig. 2a). En este periodo se registraron precipitaciones ligeras, días previos al monitoreo, que se extendieron hasta el 9 de marzo inclusive, con valores entre 0.1 mm/día y 0.4 mm/día (Fig. 3), lo cual fue asociado al ingreso de un frente frío al noroeste del mar Caribe que generó nubosidad y lluvias dispersas sobre esta área. Pero en general hubo un predominio de condiciones de tiempo seco (Moreno *et al.*, 2019), lo que confirma las características propias de la época seca definidas para este periodo estacional. En febrero de 2020 los vientos dominantes fueron del este con intensidades de 13 a 17 nudos y una altura de oleaje entre 0.5 m a 2.5 m, con sus máximos entre 2.2 m y 2.5 m concentrados en la misma zona descrita en marzo de 2019, ubicada unos kilómetros al norte del área de estudio (Fig. 2f). Durante este mes se observó el predominio de tiempo seco, característico de la época, con algunas precipitaciones aisladas durante los días 3, 7 y 10 febrero, cuyos valores fueron inferiores a 0.17 mm/día (Fig. 3), a causa de las oscilaciones de la ZCIT que afecta la zona sur de Caribe colombiano.

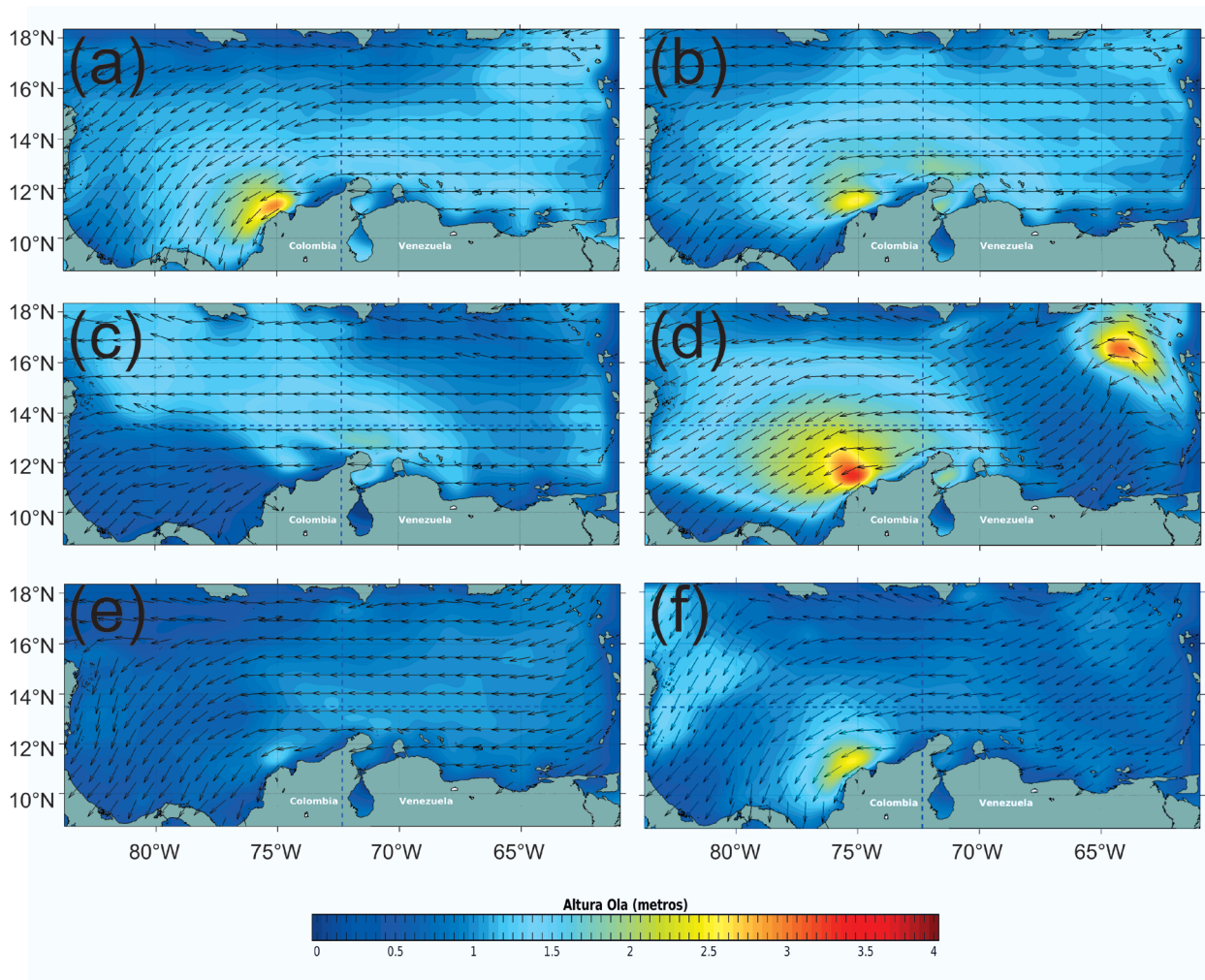


Figura 2. Campo de altura y dirección de ola en el Caribe colombiano para (a) marzo, (b) mayo, (c) junio, (d) agosto, (e) noviembre de 2019 y (f) febrero de 2020. (Fuente: Imágenes editadas de <https://www.cioh.org.co/meteorologia/CaribWan.php>)

En cuanto a la época de lluvias se observó que mayo de 2019 estuvo caracterizado por la presencia en el suroeste del mar Caribe de una línea de inestabilidad, asociada con el posicionamiento de un sistema de baja presión de 1010 mbar, lo que generó abundante nubosidad y precipitaciones ligeras sobre gran parte del litoral Caribe colombiano (Moreno *et al.*, 2019). Los vientos predominantes en la cuenca del mar Caribe fueron del este y sus velocidades estuvieron entre 13 y 20 nudos, con alturas

de ola entre 1.1 m y 2.5 m, con un máximo de oleaje de 2.5 m ubicado unos kilómetros al norte de la estación Antares (Fig. 2b). Los ocho días previos a la fecha del monitoreo (9 de mayo de 2019) dan cuenta de un registro de precipitación acumulado de 7.8 mm/día (Fig. 3), lo cual es característico de la época de lluvias, que en particular, para la época de estudio, dio inicio formal con una precipitación de 20 mm/día registrada para el 20 abril de 2019 (Moreno *et al.*, 2019).

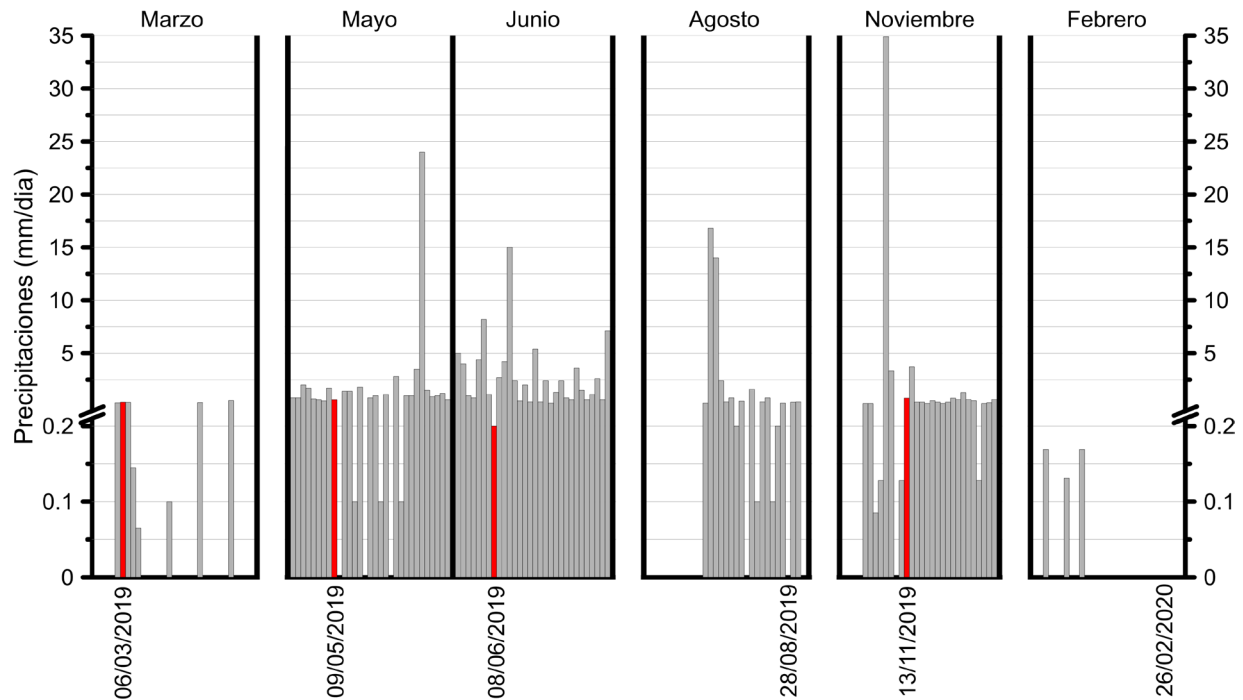


Figura 3. Comportamiento mensual de la precipitación diaria reportada para marzo, mayo, junio, agosto y noviembre de 2019 y febrero de 2020. Las barras rojas, representan la fecha de cada periodo de monitoreo. (Fuente: datos tomados de Moreno *et al.*, 2019).

Para junio se observa un cambio en la magnitud y dirección de ola, con un desplazamiento de dirección oeste a una velocidad aproximada de 15 nudos (Moreno *et al.*, 2019) y una altura del oleaje que osciló entre 0 m y 1.5 m (Fig. 2c). Este tercer monitoreo se caracterizó por presentar un valor de precipitación acumulada de 19.70 mm/día durante los ocho días previos a la fecha del mismo (8 de junio de 2019) (Fig. 3), lo que ubica este mes como el segundo periodo con mayores precipitaciones en la época de lluvias valoradas por el presente estudio.

Agosto puede considerarse como un periodo transicional entre el veranillo de San Juan (julio) y el inicio de la época de mayores precipitaciones el año, razón por la cual se observan condiciones dominadas por un sistema de baja presión (1010 mbar) que propició el desarrollo de nubosidad convectiva (nubes de lluvia) y precipitaciones de intensidad ligera a moderada sobre el suroeste del mar Caribe y sur del litoral Caribe colombiano (Moreno *et al.*, 2019). Durante este periodo se evidencia la intensificación de los vientos con un predominio de dirección este y noreste, velocidades de 14 a 22 nudos y la altura de oleaje entre 0.5 m y 3.0 m (Fig. 2d). En cuanto a la precipitación, los ocho días previos a

la fecha de monitoreo (28 de agosto de 2019) dan cuenta de una precipitación acumulada de 1.9 mm/día (Fig. 3), lo que significa que en este periodo se presentaron los menores registros de la época de lluvias valorada por el presente estudio.

Finalmente, lo esperado para noviembre fue el registro de los máximos de precipitación de la época de lluvias en la región, dada la abundante nubosidad convectiva que caracteriza este periodo estacional. En particular se observó la presencia de un sistema de baja presión (1008 mbar) ubicado al sur del litoral Caribe colombiano, asociado con un canal monzónico a la altura de los 09° N, se confirma la presencia de abundante nubosidad convectiva, que favoreció la presencia de precipitaciones de intensidad moderada sobre el suroeste del litoral Caribe. Los vientos predominantes fueron de dirección este-noreste, con velocidades de 9 a 15 nudos y una altura de ola entre 0.0 m y 1.5 m. En cuanto a la precipitación, se confirma que durante los ocho días previos a la fecha de monitoreo (13 de noviembre de 2019) se presentó la mayor precipitación acumulada del presente estudio, con un valor de 39.34 mm/día (Fig. 3), lo que indica que este mes es altamente lluvioso.

Descripción oceanográfica: las dos épocas climáticas descritas a partir de la información meteorológica se evidencian igualmente por las condiciones oceanográficas que caracterizaron las seis fechas de monitoreo con los meses de marzo y febrero, que describen los menores valores superficiales de temperatura (27 °C a 27.5 °C) y mayores salinidades (~36.25) de todo el estudio (Fig. 4) y cuya estructura vertical muestra una capa superficial de 30 m de profundidad, más cálida (~27 °C) y menos salina (~36) (Fig. 4) que el resto de la columna de agua, con un mayor incremento de temperatura de hasta 4 °C observado en marzo de 2019 (Fig. 4a), frente a un incremento de 2 °C observado en febrero de 2020 (Fig. 4 b). En cuanto a la salinidad, al igual que la temperatura, se observa un mayor incremento en profundidad durante marzo de 2019 (Fig. 4a) en comparación con febrero, cuya estructura halina en la vertical fue ligeramente homogénea (Fig. 4b). A pesar de estas sutiles diferencias entre los dos periodos de monitoreo, las características observadas en cada uno concuerdan con lo que otros autores (Maza *et al.*, 2016) han definido como propias de la época seca en el mar Caribe colombiano.

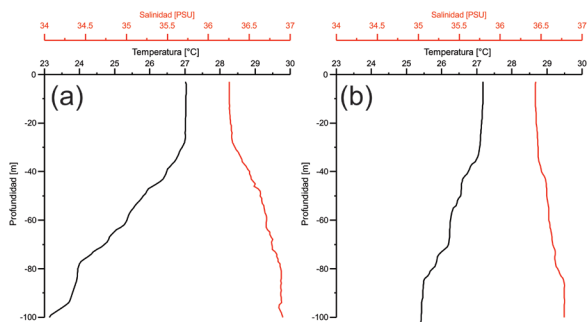


Figura 4. Perfil vertical de temperatura y salinidad medidos por CTD para (a) 6 de marzo de 2019 y (b) 26 de febrero de 2020. La línea roja representa la salinidad y la línea negra la temperatura.

En cuanto a las condiciones oceanográficas de la época de lluvias, representada por los seguimientos del 9 de mayo, 8 de junio, 28 de agosto y 13 de noviembre de 2019, se observan valores superficiales de temperatura del mar entre 29 °C y 29.6 °C y de salinidad entre 34.5 y 35.5 (Fig. 5). Estas aguas cálidas superficiales y menos salinas, observadas para la zona de estudio, pueden ser consecuencia de las precipitaciones previas registradas en la región (Fig. 3), las cuales se reflejan en la estructura vertical que muestra para los cuatro periodos de monitoreo un patrón similar caracterizado por una

capa superficial (30 m) más cálida (entre 27 °C y 29.5 °C) y menos salina (34.5 y 35.5) (Fig. 5a, b, c y d) que los registros de la época seca, siendo junio el perfil vertical (Fig. 5b) que describe los menores valores superficiales de salinidad (34.5) y mayores valores de temperatura (29.5 °C), y mayo el perfil que presentó la estructura vertical (> 20 m) menos salina (Figura 5 a) de los cuatro periodos representativos de la época de lluvias valorados por este estudio.

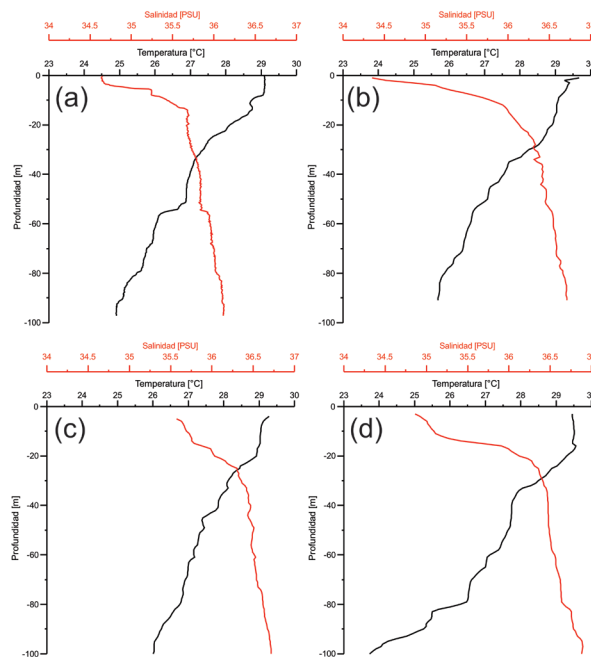


Figura 5. Perfil vertical de temperatura y salinidad medidos por CTD para (a) 9 de mayo, (b) 8 de junio, (c) 28 de agosto y (d) 13 de noviembre de 2019. La línea roja representa la salinidad y la línea negra la temperatura.

Variabilidad de la pendiente espectral del CDOM

La variabilidad de la pendiente espectral del CDOM (S_{CDOM}) está directamente relacionada con la variabilidad del coeficiente de absorción del CDOM, cuyos espectros medidos se muestran por primera vez en este programa de monitoreo (Fig. 6). En esta figura se ilustran los espectros medidos (línea negra) con sus respectivos espectros ajustados (línea roja) mediante un modelo exponencial simple ($y=Ae^{(-S*\lambda)}$) aplicado a una porción del espectro de $a_{CDOM}(\lambda)$ entre 350 nm y 500 nm, en donde a pesar del aparente

ruido aleatorio de las muestras se observa que el ajuste exponencial aplicado fue confiable ($r^2 > 0.97$ % y $RMSE < 0.0037$), por consiguiente la S_{CDOM} derivada será comparable con otros estudios.

En estos espectros de $a_{CDOM}(\lambda)$ se evidencian marcadas diferencias entre la época seca representada por el monitoreo del 6 de marzo y 26 de febrero, y la época de lluvias representada por los seguimientos del 9 de mayo, 8 de junio, 28 de agosto, 13 de noviembre y 26 de febrero de 2020.

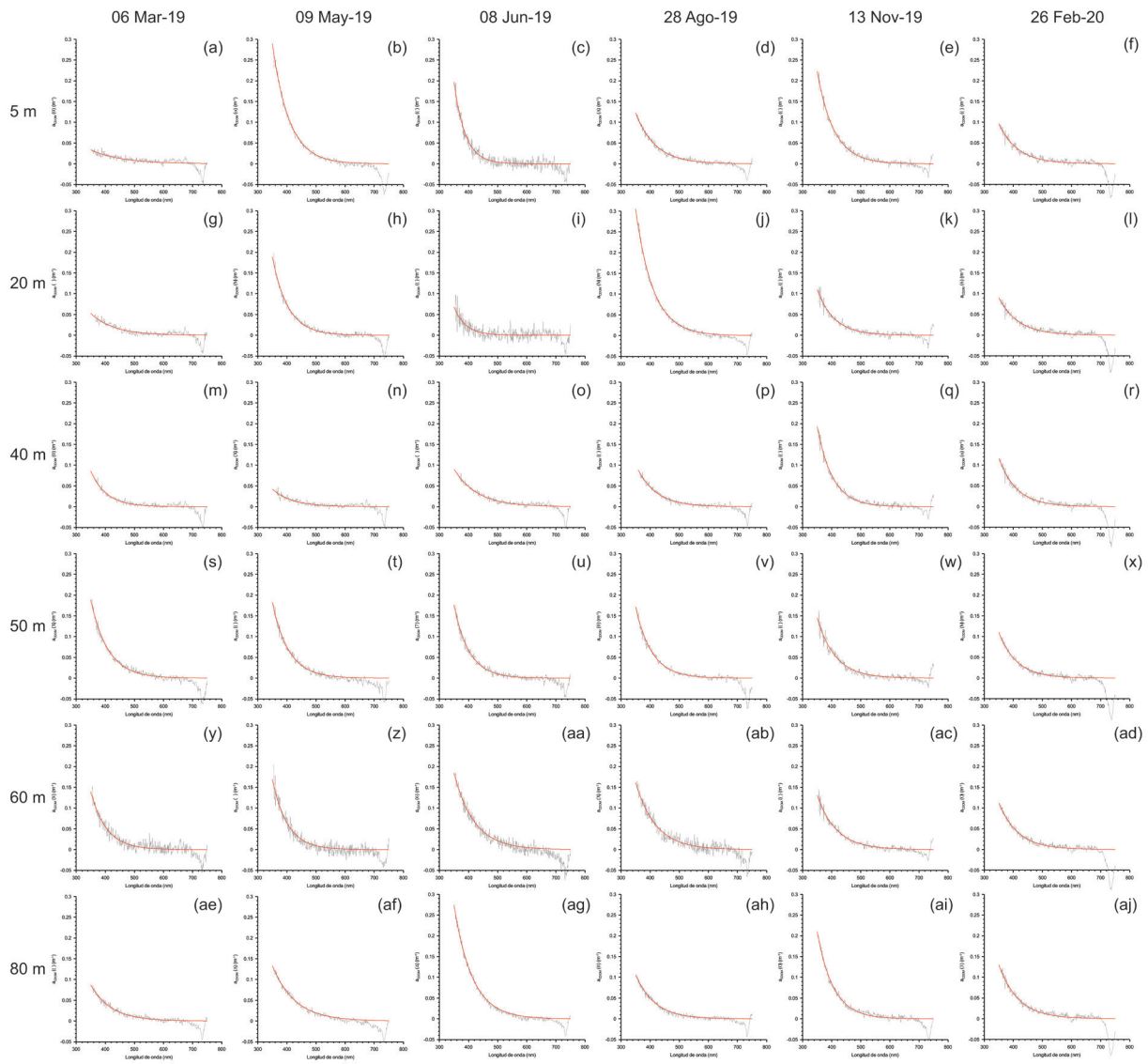


Figura 6. Espectros de absorción del CDOM medidos (líneas negras) con sus respectivos espectros ajustados (líneas rojas) correspondientes a cuatro periodos de monitoreo (6 de marzo, 9 de mayo, 8 de junio y 28 de agosto de 2019) y seis profundidades (5 m, 20 m, 40 m, 50 m, 60 m y 80 m).

28 de agosto y 13 de noviembre de 2019, sobre todo en la capa superficial (profundidades de 5 m y 20 m), en donde se observa que los espectros de marzo (Fig. 6a y 6g) difirieren de los otros periodos en un orden de magnitud (Fig. 6 b-f y 6 h-l). Estas diferencias en la vertical son

el reflejo de las condiciones meteorológicas y oceanográficas descritas previamente, las cuales muestran una masa de agua superficial altamente dinámica y dependiente de la estacionalidad.

Con el fin de identificar si existían diferencias estadísticamente significativas de los valores del $a_{\text{CDOM}(443)}$, S_{CDOM} y clorofila *a*, entre los periodos de monitoreo (época seca y lluvias) y/o entre profundidades (5 m, 20 m, 40 m, 50 m, 60 m y 80 m) se aplicó un análisis multivariado de agrupación de variables, usando el coeficiente de correlación de distancia con el método de ligamiento promedio (Average Linkage, Correlation Coefficient Distance) y se encontró que la variabilidad estacional es evidente cuando se analizan las mediciones a 5 m y 20 m,

mientras que el análisis de agrupación aplicado a todo el perfil vertical sin discriminación de profundidades, no permitió evidenciar una clara separación entre periodos estacionales (dendogramas no incluidos). Esto se debe a las diferencias en la estructura vertical que pudo ser confirmado cuando se aplicó el análisis de agrupación para identificar si había diferencias entre las profundidades y se formaron dos grupos de variables, uno integrado por las profundidades de 5 m y 20 m, y el otro integrado por las demás profundidades (dendogramas no incluidos).

Tabla 2. Valores de coeficiente de absorción del CDOM a 443 nm ($a_{\text{CDOM}(443)}$), pendiente espectral del espectro de $a_{\text{CDOM}(\lambda)}$ (S_{CDOM}) y concentración de clorofila *a*, determinados a diferentes profundidades durante seis periodos de monitoreo en la estación Antares, Cartagena.

Variable	Profundidad [m]	6 Mar 2019	9 May 2019	8 Jun 2019	28 Ago 2019	13 Nov	26 Feb 2020
$a_{\text{CDOM}(443)}$ [m^{-1}]	5	0.014	0.032	0.018	0.031	0.045	0.023
	20	0.016	0.030	0.007	0.066	0.023	0.023
	40	0.015	0.035	0.025	0.023	0.034	0.026
	50	0.011	0.040	0.028	0.040	0.033	0.024
	60	0.028	0.033	0.048	0.062	0.032	0.027
	80	0.025	0.058	0.042	0.026	0.039	0.033
S_{CDOM} [nm^{-1}]	5	0.009	0.018	0.026	0.015	0.017	0.015
	20	0.013	0.019	0.025	0.017	0.017	0.015
	40	0.018	0.018	0.019	0.014	0.019	0.016
	50	0.015	0.017	0.019	0.013	0.016	0.016
	60	0.013	0.019	0.014	0.016	0.015	0.015
	80	0.015	0.017	0.014	0.015	0.018	0.015
Clorofila <i>a</i> [mg/m^3]	5	0.040	0.390	0.533	0.385	0.424	0.115
	20	0.060	0.180	0.585	0.296	0.304	0.115
	40	0.070	0.239	0.764		0.421	0.174
	50	0.220	0.371	0.280	0.110	0.508	0.264
	60	0.350	0.331		0.070	0.357	0.356
	80	0.250	0.306	0.520	0.211	0.435	0.115
Salinidad [PSU]	5	36.3	35.0	35.2	35.6	35.0	36.4
	20	36.3	35.7	36.1	36.0	36.1	36.4
	40	36.5	35.8	36.4	36.5	36.5	36.5
	50	36.6	35.8	36.5	36.5	36.5	36.6
	60	36.7	36.0	36.5	36.5	36.6	36.6
	80	36.9	36.0	36.7	36.6	36.7	36.7

De acuerdo a lo anterior, se pudo observar (Tabla 2) que los meses de marzo de 2019 y febrero de 2020, representativos de la época seca, muestran que las profundidades de 5 m y 20 m presentan los menores valores de clorofila *a*, $a_{CDOM}(443)$ y S_{CDOM} de todo el estudio, salvo por el valor de $a_{CDOM}(443)$ de febrero de 2020. En cuanto a la época de lluvias se observó (Tabla 2) que los valores de clorofila *a*, $a_{CDOM}(443)$ y S_{CDOM} fueron mayores que las reportadas en la época seca. Para el caso de los valores de clorofila *a* en época seca, dadas las intensas condiciones climáticas, en donde el predominio de los vientos Alisios del norte/noreste generan vientos que pueden alcanzar intensidades máximas de hasta 35 nudos, con reportes de radiación solar de hasta 5.0 KWh/m² (Ideam, 2005), se espera que la actividad biológica tienda a concentrarse hacia mayores profundidades y en superficie se observen bajas concentraciones de clorofila *a* (Tabla 2); mientras que en la época de lluvias se espera que las masas de agua superficial se vean enriquecidas por los aportes de nutrientes que llegan a todo el litoral Caribe colombiano, producto de las altas precipitaciones registradas en esta época climática (Fig. 3), propiciando así una alta actividad biológica evidenciada con los mayores valores de concentración de clorofila *a* nivel superficial (Tabla 2).

Para el caso del $a_{CDOM}(443)$ y S_{CDOM} las relaciones no son tan directas y varias hipótesis

pueden ser planteadas. Diversos trabajos (Ferrari y Dowell, 1998; Kowalczyk, 1999; Blough y Del Vecchio, 2002; Babin *et al.*, 2003) y este harán parte de los que evidencian que dependiendo de las escalas espaciales y estacionales, así mismo será la dinámica y distribución del CDOM. Por ejemplo, zonas costeras influenciadas por aportes de ríos se caracterizan por presentar altos valores de absorción del CDOM y bajos valores de la S_{CDOM} , con la identificación de relaciones inversas del a_{CDOM} con la salinidad (Blough y Del Vecchio, 2002); mientras que en aguas costa afuera como es el caso de la estación Antares, Cartagena, se espera que la variabilidad en la absorción del CDOM dependa de la actividad fitoplanctónica y se espera que la S_{CDOM} registre valores más altos (Kowalczyk, 1999; Blough y Del Vecchio, 2002). Sin embargo, se ha evidenciado la dificultad de distinguir entre la producción *in situ* y el consumo de CDOM frente a la presencia de procesos de mezcla que puedan estar sufriendo las masas de agua por aportes de otras fuentes no cercanas a la zona de estudio, como lo planteado por algunos autores (Andrade *et al.*, 2015; Maza *et al.*, 2016) sobre la posibilidad de que la zona estudio esté influenciada por filamentos de la pluma del río Magdalena, o frente a procesos de blanqueamiento fotoquímico (photobleaching) que afectan la firma espectral de fuentes del CDOM (Vodacek, Blough, DeGrandpre, Peltzer y Nelson, 1997; Del Vecchio y Blough, 2002; Twardowski *et al.*, 2004).

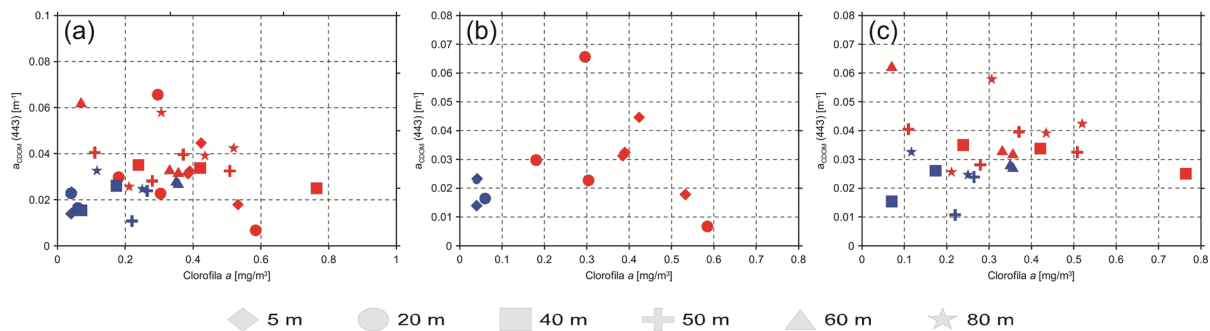


Figura 7. Diagramas de dispersión entre $a_{CDOM}(443)$ y la clorofila *a*: (a) para todos los periodos y profundidades, (b) para las profundidades 5 m y 20 m y (c) para las profundidades mayores a 40 m. Las figuras azules representan los seguimientos de época seca (6 de marzo de 2019 y 26 de febrero de 2020) y las rojas representan los seguimientos de la época de lluvias (9 de mayo, 8 de junio, 28 de agosto y 13 de noviembre de 2019).

Así entonces, se plantearon como un aporte preliminar de este set de datos el análisis de las relaciones entre el $a_{\text{CDOM}}(443)$ y la clorofila a (Fig. 7); entre la S_{CDOM} y la salinidad (Fig. 8a y 8c); entre $a_{\text{CDOM}}(443)$ y la salinidad (Fig. 8b), y entre la S_{CDOM} y $a_{\text{CDOM}}(443)$ (Fig. 8d), con miras a identificar si estas relaciones responden a una o varias de las hipótesis previamente planteadas.

Para la relación entre el $a_{\text{CDOM}}(443)$ y la clorofila a (Fig. 7) los resultados muestran una tendencia general de todo el set de datos a que los valores del $a_{\text{CDOM}}(443)$ aumenten con el incremento de la concentración de clorofila a (Fig. 7a), lo que indicaría que la actividad biológica es importante para la formación *in situ* del CDOM. Sin embargo,

al discriminar los valores de acuerdo a la capa superficial (5 m y 20 m) y el fondo (>40 m) se observó que a nivel superficial las épocas climáticas, representadas en azul (época seca) y en rojo (época de lluvias), describen tendencias diferentes, mientras que en época de lluvias la relación entre el $a_{\text{CDOM}}(443)$ y la clorofila a es inversa, en la época seca la relación es directa (Fig. 7b); esto evidencia el dinamismo de la capa superficial de la zona de estudio y cómo la actividad biológica nuevamente evidencia su papel muy importante en la variabilidad del CDOM. Por otro lado, cuando esta relación se ilustra con las muestras de más de 40 m de profundidad, la tendencia observada es una relación directa para ambas épocas.

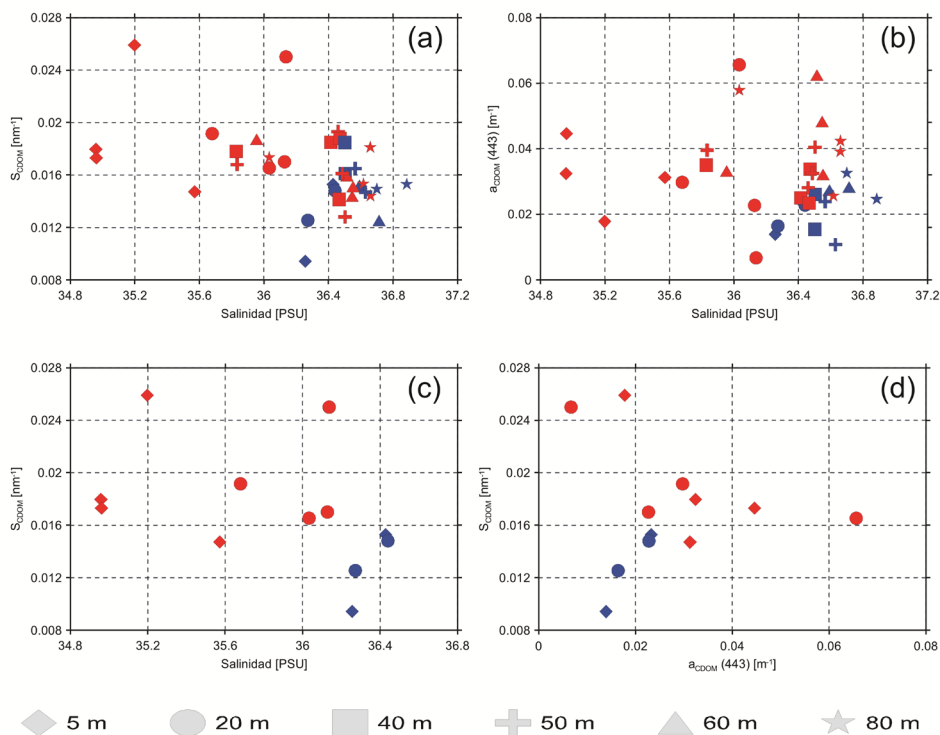


Figura 8. Diagramas de dispersión entre (a) S_{CDOM} y la salinidad, y entre (b) $a_{\text{CDOM}}(443)$ y salinidad, para todos los periodos y profundidades, así como entre (c) S_{CDOM} y la salinidad, y entre (d) S_{CDOM} y $a_{\text{CDOM}}(443)$ para las profundidades 5 m y 20 m. Las figuras azules representan los seguimientos de época seca (6 de marzo de 2019 y 26 de febrero de 2020) y las rojas representan los seguimientos de la época de lluvias (9 de mayo, 8 de junio, 28 de agosto y 13 de noviembre de 2019).

El diagrama de dispersión que ilustra la relación entre la S_{CDOM} y la salinidad sin discriminación de profundidades (Fig. 8a) registra una alta dispersión de los datos, con una tendencia general a separar las dos épocas climáticas,

pero con algunas excepciones correspondientes a los datos de profundidades mayores a 40 m. Cuando esta misma relación se ilustra para los datos correspondientes a la capa superficial (5 m y 20 m) se define una clara separación entre

la época seca y la de lluvias, con valores bajos de S_{CDOM} (0.008 nm^{-1} y 0.016 nm^{-1}) y mayores salinidades (36.3 y 36.4) asociados a la época seca, y valores altos de S_{CDOM} (0.015 nm^{-1} y 0.026 nm^{-1}) y menores salinidades (35 y 36.1) asociados a la época de lluvias (Fig. 8c). En cuanto a la tendencia de los datos, se sugiere una relación directa para la época seca, frente a relación inversa en la época de lluvias (Fig. 8c), comportamientos que son esperados y podrían confirmar que las variabilidad superficial de la salinidad en esta zona de estudio está directamente relacionada con las precipitaciones, mientras que en época seca procesos externos pueden ser los que afecten la firma espectral del CDOM.

La relación entre $a_{CDOM}(443)$ y la salinidad (Fig. 8b) sin discriminación de profundidades, al igual que la relación anterior, muestra una tendencia a separar las dos épocas climáticas y a partir de la salinidad de 36 se observa una relación directa de los datos. Los valores de $a_{CDOM}(443)$ asociados con las menores salinidades (36.1) corresponden a los seguimientos en época de lluvias y en ellos no se muestra una tendencia clara de los datos con respecto a la salinidad (Fig. 8 b). En cuanto a la relación entre S_{CDOM} y $a_{CDOM}(443)$ (Fig. 8d) para los datos correspondientes a la capa superficial (5 m y 20 m) se sostienen las diferencias entre las dos épocas climáticas observadas en las relaciones anteriores; para la época seca se muestra una tendencia a una relación directa entre la S_{CDOM} y $a_{CDOM}(443)$, mientras que en la época de lluvias la tendencia es inversa.

En resumen, de todas estas relaciones se puede evidenciar que en esta zona de estudio la formación *in situ* del CDOM está fuertemente influenciada por la actividad biológica, con la excepción de la capa superficial en época seca, donde la absorción del CDOM y su pendiente pueden estar siendo afectados por una combinación de procesos: el aportes de fuentes externas y/o procesos de blanqueamiento fotoquímico.

CONCLUSIONES

Como contribución al conocimiento de la variabilidad de coeficiente de absorción del $a_{CDOM}(\lambda)$ y su variable derivada (S_{CDOM}) en una zona ubicada costa afuera del litoral Caribe colombiano se presentan por primera vez resultados de estas variables, encontrando que los

espectros de absorción son altamente dinámicos en la capa superficial (<20m), y su variabilidad además de tener una directa relación con la estacionalidad de la región también depende de una combinación de procesos tales como la mezcla de las masas de agua por aportes de otras fuentes no cercanas, la influencia de la pluma del río Magdalena o procesos de blanqueamiento fotoquímico; mientras que en la masa de agua profunda (>40 m) los procesos biológicos se muestran como los de mayor influencia sobre la absorción del CDOM. En cuanto a la S_{CDOM} se muestra una variabilidad relativamente alta para un conjunto tan pequeño de datos, con valores bajos asociados a la capa superficial de la época seca y valores muy altos asociados a la capa superficial de la época de lluvias.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es un producto del programa de monitoreo de la Red Latinoamericana Antares, financiado por la Dirección General Marítima (Dimar) y apoyado por la Nippon Foundation y the Partnership for Observation of the Global Oceans (NF-POGO), a través del proyecto Global NANO global study of DeOxygenation, Acidification and Productivity - NANO-DOAP (<https://nf-pogo-alumni.org/projects/global/>).

Asimismo, se agradece al personal del Área de Oceanografía Operacional del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH) por el préstamo del CTD-SeaBird que mide fluorescencia, cuyos datos fueron la base para el cumplimiento de los objetivos planteados por el proyecto.

Finalmente, se agradece muy especialmente al personal del Área de Protección del Medio Marino del CIOH, quienes son responsables de la toma y análisis de los datos que alimentan este programa de monitoreo.

LISTA DE REFERENCIAS

- Andrade, C. A.; Rangel, O. E.; Herrera, E. (2015). *Atlas de los Datos Oceanográficos de Colombia 1922-2013 Temperatura, Salinidad, Densidad, Velocidad Geostrofica*. (Formato impreso y aplicativo digital). Dirección General Marítima-Ecopetrol S.A. Ed. Dimar. Bogotá, Colombia. 117 pp.
- Babin, M.; Stramski, D.; Ferrari, G. M.; Claustre, H.; Bricaud, A.; Obolensky, G.; Hoepffner,

- N. (2003). Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe. *Journal of Geophysical Research* 108, C73211. DOI: 10.1029/2001JC000882.
- Betancur-Turizo, S. P.; González-Silvera, A. G.; Santamaría-Del-Ángel, E.; Millán-Núñez, R.; Millán-Núñez, E.; García-Nava, H.; ... ; Sánchez-Velasco, L. (2017). Variability in the light absorption coefficient by phytoplankton, non-algal particles and colored dissolved organic matter in the Northern Gulf of California. *Open Journal of Marine Science*, 8(1), 20-37.
- Blough, N. V.; Del Vecchio, R. (2002). Chromophoric DOM in the Coastal Environment. In Hansell, D. A.; Carlson, C. A. (Eds.), *Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter*. Academic Press, 509-546.
- Brezonik, P. L.; Olmanson, L. G.; Finlay, J. C.; Bauer, M. E. (2015). Factors affecting the measurement of CDOM by remote sensing of optically complex inland waters. *Remote Sensing of Environment*, 157, 199-215. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.033>
- Del Vecchio, R.; Blough, N. V. (2002). Photobleaching of chromophoric dissolved organic matter in natural waters: kinetics and modeling. *Marine Chemistry*, 78(4), 231-253.
- Effler, S. W.; Perkins, M.; Peng, F.; Strait, C.; Weidemann, A. D.; Auer, M. T. (2010). Light-absorbing components in Lake Superior. *Journal of Great Lakes Research*, 36(4), 656-665.
- Ferrari, G. M.; Dowell, M. D. (1998). CDOM absorption characteristics with relation to fluorescence and salinity in coastal areas of the southern Baltic Sea. *Estuarine Coastal Shelf Sci.* 47: 91-105.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2005). *Atlas climatológico de Colombia*. Ideam. Colombia.
- Maza, M.; Voulgaris, G.; Subrahmanyam, B. (2016). Subtidal inner shelf currents off Cartagena de Indias, Caribbean coast of Colombia. *Geophysical research letters*, 33(21).
- Mitchell, B. G.; Kahru, M.; Wieland, J.; Stramska, M.; Mueller, J. L. (2002). *Determination of spectral absorption coefficients of particles, dissolved material and phytoplankton for discrete water samples. Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation, Revision, 3*, 231-257.
- Moreno, M.; Pico, S. A.; Dagua, C. J.; Herrera, D. P. (2019). *Boletín Meteorológico Mensual del Caribe Colombiano* (No.75/marzo de 2019, No.76/abril de 2019, No.77/mayo de 2019, No.78/junio de 2019, No.80/agosto de 2019) Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia: Dirección General Marítima.
- Nelson, N. B.; Siegel, D. A. (2002). *Chromophoric DOM in the open ocean. Biogeo-chemistry of marine dissolved organic matter*, 547-578.
- Riddick, C. A.; Hunter, P. D.; Tyler, A. N.; Martínez-Vicente, V.; Horváth, H.; Kovács, A. W., ... & Présing, M. (2015). Spatial variability of absorption coefficients over a biogeochemical gradient in a large and optically complex shallow lake. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(10), 7040-7066.
- Siegel, D. A.; Maritorea, S.; Nelson, N. B.; Hansell, D. A.; Lorenzi-Kayser, M. (2002). Global distribution and dynamics of colored dissolved and detrital organic materials. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 107. <https://doi.org/10.1029/2001JC000965>
- Twardowski, M. S.; Boss, E.; Sullivan, J. M.; Donaghay, P. L. (2004). Modeling the spectral shape of absorption by chromophoric dissolved organic matter. *Marine Chemistry*, 89(1-4), 69-88.
- Vodacek, A.; Blough, N. V.; DeGrandpre, M. D.; Peltzer, E. T.; Nelson, R. K. (1997). Seasonal variation of CDOM and DOC in the middle Atlantic Bight: Terrestrial inputs and photooxidation, *Limnol. Oceanogr.*, 42(4), 674- 686.