

# Diversidad del fitoplancton en la cuenca baja del río Magdalena con relación a su régimen hidrológico

## Phytoplankton diversity in the lower Magdalena River basin in relation to its hydrological regime

René A. Rojas-Luna <sup>1,2\*</sup>, Diana Pardo-Castañeda <sup>2</sup>

- Recibido: 09/Feb/2022
- Aceptado: 02/Feb/2023
- Publicación en línea: 27/Sep/2023

**Citación:** Rojas-Luna RA, Pardo-Castañeda D. 2024. Diversidad del fitoplancton en la cuenca baja del río Magdalena con relación a su régimen hidrológico. *Caldasia* 46(1):113-129. doi: <https://doi.org/10.15446/caldasia.v46n1.100385>

### RESUMEN

Conocer la dinámica del fitoplancton en relación con el régimen hidrológico y variables fisicoquímicas en un río de alto caudal es clave para la conservación de la red trófica y el manejo del recurso hídrico. Se caracterizó la comunidad de fitoplancton en un sector de 53 km de la cuenca baja del río Magdalena, en el departamento del Atlántico, y su relación con el régimen hidrológico. Se establecieron cuatro estaciones y 22 eventos de muestreo mensuales entre enero 2019 y diciembre 2020, en las cuales se filtró 30 L de agua superficial por medio de una red de fitoplancton de 23  $\mu\text{m}$ . Asimismo, se tuvieron en cuenta algunas variables fisicoquímicas *ex situ* para su análisis con respecto a la abundancia fitoplanctónica y los momentos hidrológicos. Se determinaron nueve clases y cinco phyla de microalgas. *Aulacoseira granulata* presentó la mayor abundancia relativa (515 cél/mL), seguida de las especies de *Oscillatoria* (288 cél/mL). Las estaciones denotaron una alta similitud entre ellas (>80 %) y Sabanagrande resaltó como la estación con mayor riqueza específica (53). La abundancia del fitoplancton y el nivel del agua tuvieron una relación inversamente proporcional, excepto el semestre influenciado por La Niña. Los valores altos de nitrógeno total y bajos de sólidos suspendidos asociados a los momentos de baja precipitación se relacionan con alta abundancia de algas. En conclusión, se estableció la línea base para la realización de estudios con fitoplancton en la cuenca baja del río Magdalena, lo cual permitirá el manejo del recurso hídrico.

**Palabras clave:** bioindicador, calidad del agua, hidrobiología, limnología, microalgas.

<sup>1</sup> Programa de Maestría en Biología, Colecciones Científicas, Museo de Biología, Facultad de Ciencias Básicas, Universidad del Atlántico, Barranquilla - Atlántico, Colombia. rarojas@est.uniatlantico.edu.co

<sup>2</sup> Grupo GIATA de investigaciones en agua AAA, Jefatura de Aseguramiento de la Calidad del Agua en la Subgerencia de Agua Potable, Triple A S.A. E.S.P., Barranquilla - Atlántico, Colombia. dianapardo21@hotmail.com

\* Autor para correspondencia.



## ABSTRACT

Knowledge of phytoplankton dynamics in relation to the hydrological regime and physicochemical variables in a high-flow river is key to the conservation of the food web and water resource management. The phytoplankton community in a 53 km sector of the lower Magdalena River basin, in the department of Atlántico, and its correlation with the hydrological regime were characterized. Four stations and 22 monthly sampling events were established between January 2019 and December 2020, in which 30L of surface water was filtered through a 23  $\mu\text{m}$  phytoplankton net for collection and, likewise, some *ex-situ* physicochemical variables were considered for analysis with respect to phytoplankton abundance and hydrological moments. Nine classes and five phyla of microalgae were determined. *Aulacoseira granulata* presented the highest relative abundance (515 cells/mL), followed by *Oscillatoria* species (288 cells/mL). The stations denoted a high similarity among them (>80 %) and Sabanagrande stood out as the station with the highest specific richness (53). Phytoplankton abundance and water level had an inversely proportional relationship, except for the semester influenced by La Niña. The high values of total nitrogen and low values of suspended solids associated with times of low precipitation were related to high algal abundance. In conclusion, a baseline was established for conducting studies with phytoplankton, which will allow water management of the Magdalena River.

**Keywords:** bioindicator, hydrobiology, limnology, microalgae, water quality.

## INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas dulceacuícolas se ven amenazados por la disminución de la disponibilidad de agua dulce, la pérdida de bosques y de la biodiversidad, el cambio climático y el crecimiento de la población humana (Albert *et al.* 2021). Las especies y los ecosistemas de agua dulce están cada vez más amenazados por muchas actividades humanas, como la alteración del hábitat, la contaminación del agua, los desvíos de los ríos, la fragmentación y la regulación de los caudales, la expansión de los paisajes agrícolas y urbanos, el aumento del nivel del mar y la alteración de los regímenes de precipitación (Dudgeon 2019, Grill *et al.* 2019, IPBES 2019).

El río Magdalena en su dinámica y estructura, ha demostrado ser un sistema hídrico con cambios rápidos en el tiempo (Restrepo 2015), el cual brinda una oferta hídrica indispensable para la biota, los servicios ecosistémicos y ambientales. Entre sus múltiples usos, sus aguas superficiales (Rivera *et al.* 2010) son empleadas para el abastecimiento de agua potable, pero el manejo inadecuado y la falta de planificación integral colocan en riesgo el recurso, la conservación de biodiversidad y la salud pública (Guzmán 2005, Gutiérrez-Moreno y De la parra 2020).

La utilización de indicadores biológicos es un método práctico y económico para obtener información de un ecosistema acuático que consiste en determinar qué tipo de especies hay en un hábitat y en qué cantidades, para encontrar a partir de esta información un dato que indique el estado del ecosistema (Olarte y González 2018). El fitoplancton hace parte de los organismos utilizados como bioindicadores de los ecosistemas acuáticos, donde cumple un papel importante en el mantenimiento de la red trófica debido a que son la base de la misma como productores primarios (Winder y Sommer 2012), lo que permite observar los cambios en los ecosistemas de forma inmediata (Hemraj *et al.* 2017).

En el departamento del Atlántico, los estudios en ecosistemas de agua dulce han estado principalmente enfatizados en los cuerpos con características cenagosas como el embalse El Guájaro (García-Alzate *et al.* 2016, Castellanos *et al.* 2017), la ciénaga de Luruaco (Saita *et al.* 2018), las ciénagas de Malambo y Santo Tomás (Castellanos y Gutiérrez 2009, Sarmiento y Ruiz 2017). No se encontraron estudios sobre el río Magdalena en su paso por el departamento del Atlántico en cuanto al estado, diversidad y abundancia de la comunidad fitoplanctónica; por lo que es necesario conocer la dinámica hidrobiológica en el último tramo de su

cuenca baja antes de su desembocadura en el mar Caribe, por su importancia en la seguridad hídrica, alimentaria y social de la región. Los datos acerca de los grupos de algas predominantes y los parámetros que influyen en la composición de su riqueza, brindan información clave en cuanto a la generación de toxinas, olores y sabores desagradables en el agua utilizada para el abastecimiento de agua potable (OMS 2015); sobre el hábitat para especies de peces de interés comercial y fuente hídrica para el ganado (Jiménez 2019a; Jiménez 2019b); y sobre la calidad del agua como proyecto turístico-social en el marco del Gran Malecón a lo largo de la ribera occidental del río sobre la ciudad de Barranquilla (Alcaldía de Barranquilla 2019).

Por lo tanto, es pertinente la generación de conocimiento de línea base que incentiven la realización de próximos estudios con aportes a la evaluación del estado ecológico del río Magdalena en su cuenca baja y las actividades amenazantes asociadas a su ribera, con el fin de recomendar medidas que permitan salvaguardar el ecosistema y el recurso hídrico que alimenta a gran parte del departamento del Atlántico; como por ejemplo, mediante el uso de índices bióticos con base en algas para ecosistemas acuáticos en Colombia (Hernández *et al.* 2018; 2020; Jiménez-Pérez 2019), mecanismo recomendado en la guía para el ordenamiento del recurso hídrico continental superficial expedida por el Ministerio de Ambiente (2018). Asimismo, es necesario implementar la caracterización de la diversidad fitoplanctónica para seguimientos habituales como es sugerido en la guía sobre calidad del agua (OMS 2018) y no ha sido establecido por la normativa colombiana. Por tal motivo, el objetivo de este trabajo fue la caracterización de la comunidad de fitoplancton en un tramo de la cuenca baja del río Magdalena, en su paso por el departamento del Atlántico (Colombia) y analizar su relación con los períodos secos y lluviosos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El departamento del Atlántico hace parte del último trayecto del río Magdalena por su ribera izquierda, al norte de Colombia; comprende un área que va desde el Canal del Dique –en el sur–, hasta la desembocadura del Magdalena –hacia el norte–, en Bocas de Ceniza, próximo a Barranquilla. En el Atlántico predomina un piso térmico cálido, con temperaturas que varían entre 25°C a 28°C (García-Alzate *et al.* 2016). Por otro lado, aproximada-

mente 111 kilómetros del río Magdalena corresponden a este departamento, a lo largo de este tramo, fuera de los arroyos temporales, el río no recibe otro afluente, pero a lo largo de las riberas, gracias al bajo nivel de las tierras, éstas se anegan en épocas de crecientes, formando caños y ciénagas (Ángulo 1954).

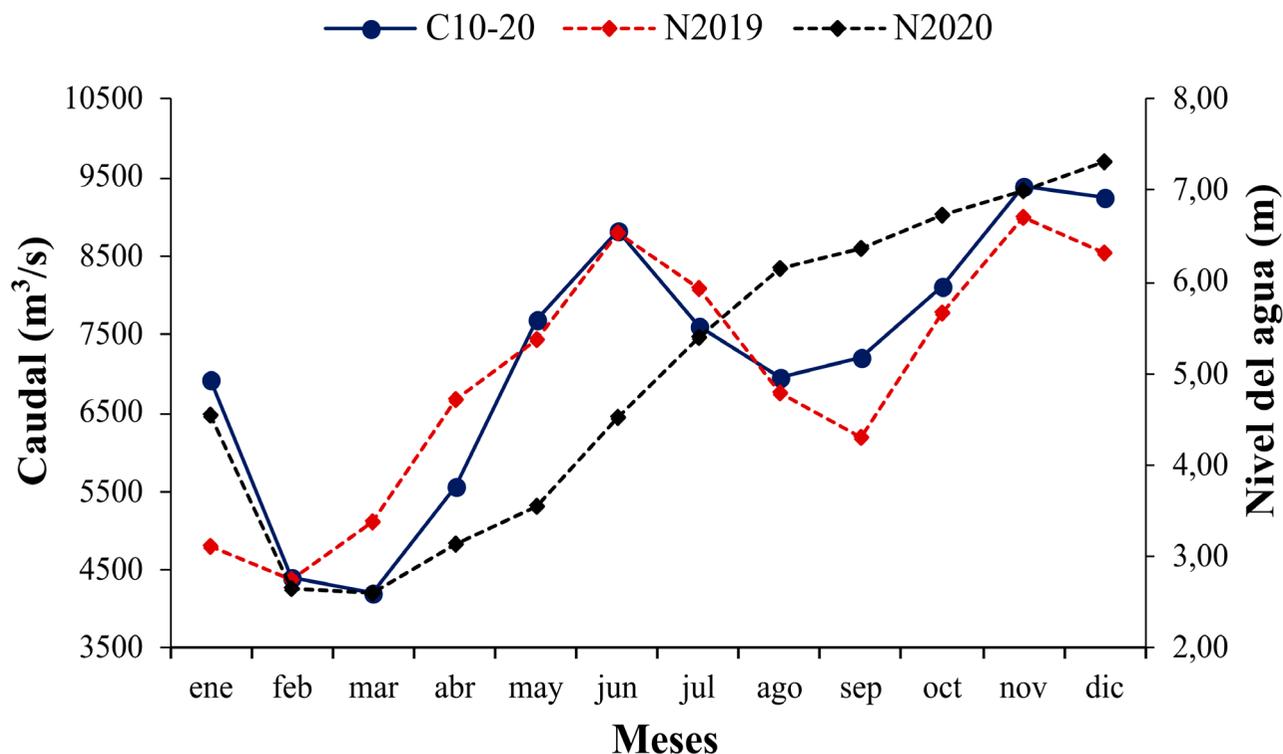
El río Magdalena se caracteriza por tener un régimen hidrológico bimodal (Fig. 1): dos momentos asociados a lluvias y dos momentos asociados a sequías. Sin embargo, entre cada período se da un proceso de transición del nivel del agua, que es clave en la hidrología de la cuenca. Los períodos asociados a las primeras lluvias que elevan el nivel del río (aguas en ascenso) se dan principalmente entre marzo-mayo y septiembre-octubre, con niveles máximos en junio y noviembre (aguas altas); por otro lado, el lapso cuando las lluvias se ausentan y el nivel del agua disminuye (aguas en descenso) ocurre en diciembre-febrero y julio-agosto, con meses de precipitaciones mínimas (aguas bajas) en marzo y septiembre (Restrepo *et al.* 2020).

En cada muestreo se tuvieron en cuenta cuatro estaciones de trabajo en tres municipios del departamento: Barranquilla - Las Flores (E1: 74°49'46,71" Oeste, 11°02'48,3" Norte), Barranquilla - Puente Pumarejo (E2: 74°45'39,8" Oeste, 10°56'48,6" Norte), Sabanagrande (E3: 74°44'17,8" Oeste, 10°47'57,7" Norte) y Ponedera (E4: 74°43'45,77" Oeste, 10°37'6,68" Norte), las cuáles fueron establecidas teniendo en cuenta la ubicación de los diferentes sistemas de captación de agua para las plantas de tratamiento de agua para consumo humano operadas por la Sociedad de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Barranquilla. Entre la estación ubicada más al norte (E1) y la ubicada más al sur (E4) del departamento, hay un tramo de 53 km de río aproximadamente.

### Fase de campo

Se realizaron 22 muestreos mensuales entre los meses de enero de 2019 y diciembre de 2020, exceptuando los meses de marzo y octubre (2020) porque no fue posible realizar la recolecta de muestras por las medidas de seguridad a causa de la pandemia declarada por el Covid-19, no obstante, se pudieron demarcar los diferentes momentos del régimen hidrológico del río para cada uno de los años a partir del caudal promedio de la década del río Magdalena.

En cada estación, se tomó una muestra de agua en un frasco de 1 L la cual fue refrigerada en una cava con hielo para su posterior análisis de sólidos suspendidos totales (SST)



**Figura 1.** Promedio histórico del caudal del río Magdalena en la estación Calamar 2010-2020(C10-20) proporcionado por los datos hidrometeorológicos del IDEAM y nivel del agua del río Magdalena a la altura de Calamar – Atlántico 2019 (N2019) y 2020 (N2020) tomado de CORMAGDALENA con apoyo del IDEAM.

en laboratorio. De igual manera, se tomó una muestra de agua en un frasco de 500 mL que fue preservada con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> hasta mantener el pH menor a 2,0 y además fue refrigerada a una temperatura menor o igual a 6°C para caracterizar Nitrógeno total (N<sub>T</sub>) y Fósforo total (P<sub>T</sub>) (APHA 2017), en el laboratorio de Control de Calidad del Acueducto de Barranquilla.

Conjuntamente a la parte fisicoquímica, se tomó un volumen de agua superficial (30 L) y se filtró por medio de una red para captura de fitoplancton de 23 µm de diámetro. En todas las estaciones se tomó la muestra directamente sobre el margen izquierdo del río, excepto en el Acueducto de Barranquilla, donde la muestra se tomó en la dársena, estructura que funciona como pre-sedimentador y reservorio de agua, antes de entrar a las plantas de tratamiento. Las muestras filtradas se almacenaron en frascos de vidrio de color ámbar de 250 mL, fijadas con formalina taponada al 10 % y transportadas, para su identificación y recuento, al laboratorio de Control de Calidad del Acueducto de Barranquilla.

#### Fase de laboratorio

A las muestras recolectadas para análisis fisicoquímicos se le realizaron análisis de nitrógeno total (mg/L) y fósforo total (mg/L) mediante Kits Spectroquant de la casa comercial Merck. Previo a la determinación de fósforo total por kit, la muestra fue neutralizada para obtener todo el P<sub>T</sub> disponible, mediante una digestión de ácido sulfúrico y ácido nítrico (método 4500-P B.4 APHA). Adicionalmente, se midieron sólidos suspendidos totales siguiendo la metodología propuesta por American Public Health Association - APHA (2017).

El recuento de fitoplancton se realizó por el registro de la muestra, la cual fue previamente homogenizada, antes de tomar con una pipeta calibrada con precisión un volumen de 1 mL, que se puso en la cámara de Sedgewick-Rafter y debajo del cubreobjetos, para finalmente hacer la lectura y obtener el recuento de los organismos que abarcan el área y volumen total de la cámara (APHA 2017) como ha sido utilizado en otros estudios (Hernández *et al.* 2008, 2018; Blanco-Muñoz *et al.* 2020). La determinación se realizó

**Tabla 1.** Valores promedios de parámetros fisicoquímicos por estaciones. E1: Barranquilla – Las Flores, E2: Barranquilla – Acueducto, E3: Sabana-grande, E4: Ponedera.

Estaciones	Nitrógeno total (mg / L)	Fósforo total (mg / L)	Sólidos Suspendidos Totales (mg / L)
Barranquilla - Las Flores	1,08 ± 0,40	0,87 ± 0,72	156,10 ± 65,51
Barranquilla – Acueducto	1,50 ± 0,72	0,95 ± 0,50	121,08 ± 45,60
Sabanagrande	0,92 ± 0,35	0,95 ± 0,64	148,26 ± 67,95
Ponedera	0,92 ± 0,33	0,98 ± 0,88	255,91 ± 112,22

por observación directa a través de un microscopio óptico, en aumento máximo de 200X.

La identificación del fitoplancton se efectuó mediante claves taxonómicas, material iconográfico propio y material de investigación como van Vuuren *et al.* (2006), Moreno *et al.* (2012), Oliva-Martínez *et al.* (2014), APHA (2017). La identificación de las microalgas se llevó al nivel taxonómico de especie, sin embargo, algunos taxones se tuvieron que separar a nivel de morfoespecie. Para la revisión de los nombres taxonómicos y las sinonimias se consultaron las bases de datos en línea: National Center for Biotechnology Information (NCBI) y AlgaeBase. La cuantificación del número de células fitoplanctónicas por mililitro se obtuvo mediante la lectura completa de la placa de Sedgewick-Rafter para cada una de las muestras tomadas durante el estudio.

#### Análisis de los datos

A los datos de las variables fisicoquímicas se les aplicó estadística descriptiva como mínimos, máximos, promedio y desviación estándar. Para evaluar la normalidad de estos se utilizó una prueba de Shapiro-Wilk. Como los datos no se ajustaron a la distribución normal, para la determinación de diferencias significativas entre muestreos y estaciones por cada variable, se utilizaron pruebas de Kruskal-Wallis. Se realizó un análisis multidimensional no métrico (NMDs) para relacionar las variables fisicoquímicas con la abundancia del fitoplancton en cada uno de los momentos hidrológicos del río Magdalena.

El análisis cualitativo de las microalgas consistió en realizar un inventario de taxones, generando una lista de especies; se determinó la riqueza de fitoplancton como el número de especies encontradas y la abundancia relativa como el número de individuos por mililitro. La estructura y equidad de la comunidad fueron descritas mediante una curva de rango-abundancia y los índices de dominancia

(D) y diversidad de Simpson (1-D). Teniendo en cuenta la composición del fitoplancton, se realizó un diagrama de similitud de Jaccard para medir el grado de similitud entre las estaciones y los muestreos (Blanco-Muñoz *et al.* 2020). De igual forma se utilizó un test de normalidad de Shapiro-Wilk para el número promedio de individuos recolectados por estaciones y por momentos del régimen hidrológico. Con el fin de comprobar si existió variación espacial de la abundancia relativa del fitoplancton, se realizó un test de Kruskal-Wallis debido a que los datos tuvieron distribución no normal; por otro lado, para determinar diferencias entre la variación temporal de los años 2019 y 2020, se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) simple por lo que los datos tenían una distribución normal. Asimismo, se usó un análisis de contraste mediante el coeficiente de correlación de Pearson ( $\rho$ ) para establecer el grado y el sentido de la asociación entre la abundancia relativa de las microalgas y los distintos momentos del régimen hidrológico en ambos años.

## RESULTADOS

#### Variables fisicoquímicas

El  $N_T$  varió espacialmente ( $H= 13,40$ ;  $p= 0,003$ ) con valores mínimos en Sabanagrande y Ponedera, con valores menores a 0,5 mg/L y valores máximos de 3,73 mg/L y 1,92 mg/L en Barranquilla-Puente Pumarejo y Barranquilla-Las Flores, respectivamente. De igual forma, los valores registrados de SST variaron significativamente entre estaciones ( $H= 16,21$ ;  $p= 0,001$ ) y presentaron mínimos en Sabanagrande con 62 mg/L y máximos de 543 mg/L en Ponedera. Por otro lado, el fósforo total no se observó variante entre las estaciones ( $H= 6,05$ ;  $p= 0,10$ ) (Tabla 1).

En el 2019, se observó variación temporal de fósforo total y sólidos suspendidos totales y no para el nitrógeno total ( $H= 10,85$ ;  $P = 0,14$ ). El  $P_T$  osciló temporalmente

( $H= 18,16$ ;  $P = 0,002$ ) con valores mínimos menores a 0,5 mg/L en los dos períodos de aguas en ascenso del año y máximos en el segundo momento de aguas altas con 3,89 mg/L. En cuanto a los SST, presentaron fluctuaciones ( $H= 17,02$ ;  $p= 0,01$ ) entre 62 mg/L en el segundo momento de aguas bajas y 543 mg/L en el primer momento de aguas en ascenso. Por otro lado, en el 2020 se observó el comportamiento contrario, donde solo el  $N_T$  denotó variación temporal y el  $P_T$  y SST no ( $H= 5,49$ ;  $p= 0,59$  y  $H= 9,89$ ;  $p= 0,19$ ). El nitrógeno total fluctuó en los momentos del pulso de inundación ( $H= 14,49$ ;  $p= 0,04$ ), con valores mínimos de 0,53 mg/L en el segundo momento de aguas bajas y valores máximos de 3,73 mg/L en el primer período de aguas en descenso (Tabla 2).

**Fitoplancton**

Se determinaron 32 especies y 26 morfoespecies en cinco phylum, 46 géneros y nueve clases (Tabla 3). Los phyla con más riqueza de especies fueron Bacillariophyta (34,8 %), seguido de Chlorophyta (33,7 %), Cyanobacteria (15,3 %), Euglenozoa (15,2 %) y por último Miozoa (1,1 %). De igual

manera, la distribución de especies dentro de las clases tuvo la siguiente organización: Bacillariophyceae (25,9 %), Chlorophyceae (20,7 %), Cyanophyceae y Euglenophyceae (13,8 %), Zygnematophyceae (10,3 %), Trebouxiophyceae (6,9 %), Coscinodiscophyceae (5,2 %) y, por último, Mediophyceae y Dinophyceae (1,7 %). Por otro lado, la estación más rica en especies fue Sabanagrande (53), seguida de Barranquilla-Puente Pumarejo y Las Flores (50) y la de menos riqueza específica fue Ponedera (45).

La especie que predominó en las cuatro estaciones durante los dos años de estudio fue *Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen con 515 Cél/mL en promedio, seguida de las especies del género *Oscillatoria* Vaucher ex Gomont con mayores abundancias con 288 Cél/mL. Asimismo, se registró especies con números de individuos medios como *Lindavia comta* (Kützing) Nakov *et al.* (110 Cél/mL), *Melosira varians* Agardh (100 Cél/mL), *Dolichospermum* sp. (54 Cél/mL) y *Navicula tripunctata* (Müller) Bory (28 Cél/mL). Por otro lado, otros taxones aparecieron únicamente para ciertos muestreos y estaciones, como es el caso

Tabla 2. Valores promedios por régimen hidrológico del río. Ad: Aguas en descenso, AB: aguas bajas, Aa: aguas en ascenso, AA: aguas altas.

Año (Semestre)	Muestras	Nitrógeno total (mg / L)	Fósforo total (mg / L)	Sólidos Suspendidos Totales (mg / L)
2019-I	Ad	1,16 ± 0,30	0,64 ± 0,16	118,51 ± 29,14
	AB	1,27 ± 0,36	0,64 ± 0,16	210,01 ± 25,13
	Aa	1,07 ± 0,41	0,50 ± 0,00	356,75 ± 137,24
	AA	0,71 ± 0,31	0,67 ± 0,30	207,58 ± 98,65
2019-II	Ad	1,09 ± 0,40	0,50 ± 0,00	158,18 ± 76,24
	AB	1,34 ± 0,29	1,07 ± 0,63	80,38 ± 28,89
	Aa	0,78 ± 0,46	0,50 ± 0,00	175,13 ± 106,50
	AA	0,91 ± 0,19	3,00 ± 0,75	174,50 ± 51,58
2020-I	Ad	1,64 ± 1,39	0,84 ± 0,43	133,68 ± 46,49
	AB	1,09 ± 0,50	0,75 ± 0,29	99,28 ± 38,95
	Aa	1,57 ± 0,41	0,89 ± 0,32	150,48 ± 48,69
	AA	1,18 ± 0,36	1,46 ± 0,72	235,63 ± 127,30
2020-II	Ad	1,56 ± 0,53	1,00 ± 0,33	118,45 ± 48,24
	AB	0,66 ± 0,14	1,02 ± 0,49	157,50 ± 39,90
	Aa	0,83 ± 0,20	0,80 ± 0,20	183,50 ± 82,07
	AA	0,82 ± 0,09	0,68 ± 0,12	165,88 ± 79,28

de *Rhopalodia* sp., *Diacanthos* sp., *Ankistrodesmus* sp., *Chroococcus* sp. y *Peridinium volzii* Lemmermann, con abundancias por debajo de 5 Cél/mL.

La estructura y equidad de la comunidad fitoplanctónica entre las dos estaciones de Barranquilla presentaron mayor similitud (Fig. 2) con valores bajos de dominancia de especies ( $D_{E1}$ : 0,16 y  $D_{E2}$ : 0,15) y valores alto de diversidad de especies ( $1-D_{E1}$ : 0,84 y  $1-D_{E2}$ : 0,85). En cuanto a las otras dos estaciones, se caracterizaron por poseer mayor número de especies abundantes y únicas como es el caso de Sabanagrande ( $D_{E3}$ : 0,14 y  $1-D_{E3}$ : 0,86) o por poseer especies dominantes con menor proporción de especies con abundancias medias que las estaciones anteriores, en Ponedera con *Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen ( $D_{E4}$ : 0,21 y  $1-D_{E4}$ : 0,79). Las especies que predominan en todas las estaciones de las clases Bacillariophyceae y Cyanophyceae contribuyen con más del 50 % de la abundancia relativa de la comunidad, y el número más alto de dominancia se observó en Ponedera y estuvo predominado por *A. granulata* (44 %).

Teniendo en cuenta el análisis de similitud de Jaccard, la comunidad fitoplanctónica en las cuatro estaciones muestreadas en el tramo del río Magdalena en el departamento del Atlántico, son muy similares entre sí (> 80 %). Haciendo énfasis, el fitoplancton en las estaciones Sabanagrande y del Puente Pumarejo de Barranquilla es más parecido entre sí compartiendo el 87 % del total de las especies del fitoplancton, y a su vez, son más similares a Ponedera que con Las Flores en Barranquilla, que es el más disímil entre las estaciones, debido a que es la captación del río más cercana a la desembocadura en el mar Caribe (Fig. 3a).

Por otro lado, los períodos de aguas en descenso y aguas bajas (2020), aguas bajas y aguas en ascenso (2019) fueron muy parecidos con un valor entre el 70 y 75 % de similitud, que, a su vez, fueron similares a los períodos de aguas en descenso (2019) y aguas en ascenso (2020) con una similitud entre 65 y 70 %. Los valores de recambio de la composición y equidad de la comunidad de fitoplancton fueron mayores en la época de aguas altas de ambos años, momento cuando se registran los niveles máximos de agua y caudal del río, con más del 35 % de diferencias, con respecto a los demás momentos del régimen hidrológico (Fig. 3b).

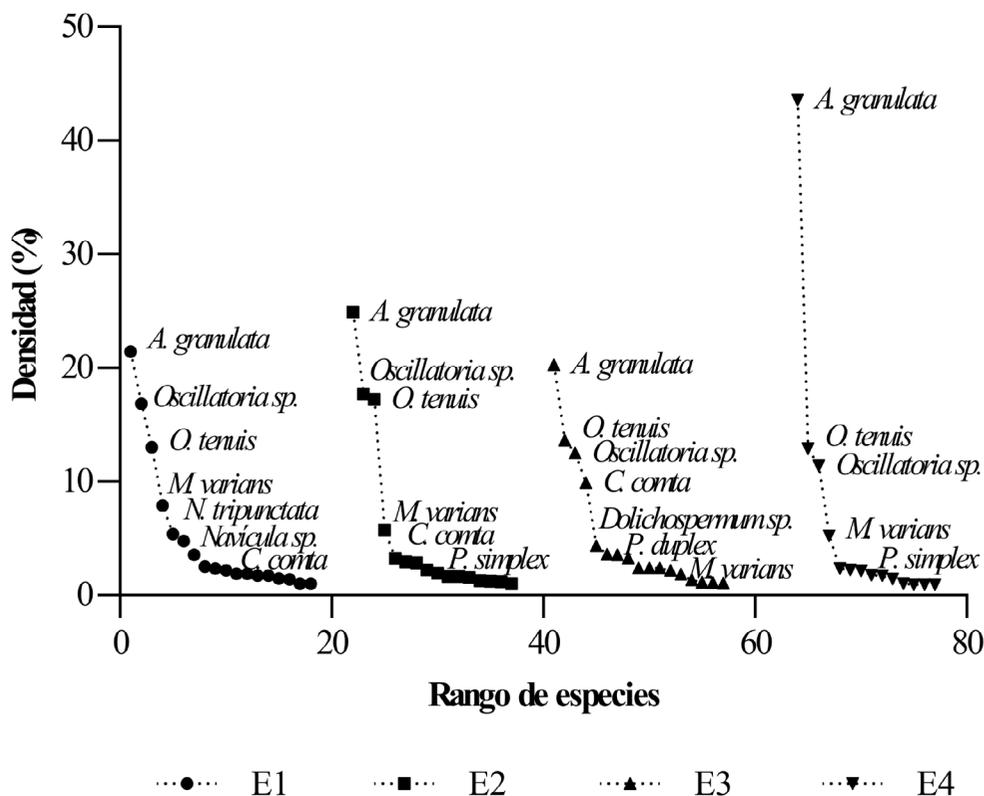


Figura 2. Curva de rango-abundancia de la comunidad de fitoplancton reportada en el tramo del río Magdalena, en el departamento del Atlántico. E1: Barranquilla - Las Flores, E2: Barranquilla - Acueducto, E3: Sabanagrande, E4: Ponedera.

En términos de abundancia del fitoplancton, los años 2019 y 2020 fueron muy dispares debido a los cambios drásticos que tuvo el régimen hidrológico del río en el último año influenciado por el Fenómeno de La Niña registrado por el IDEAM (2019:  $4291 \pm 160$  ind/mL; 2020:  $2045 \pm 60$  ind/mL). En el primer semestre de ambos años, se nota una clara relación en el recuento del fitoplancton y el nivel del agua del río, siendo inversamente proporcional ( $r: -0,73$  y  $p$ -valor:  $0,007$ ); en los momentos de bajo nivel del agua (aguas bajas principalmente y aguas en descenso) la abundancia fitoplanctónica es alta y, por el contrario, cuando el agua comienza a subir y alcanza los niveles máximos, los recuentos disminuyen notablemente. En el momento correspondiente a aguas en descenso del primer semestre de 2019 (Fig. 4a), momento en el cual los niveles del río, específicamente en el mes de enero, las aguas deben bajar paulatinamente, se dio una disminución abrupta e influyó rápidamente en el fitoplancton denotando en que los números de algas por recuento estuvieron por debajo del momento correspondiente a aguas bajas.

Por otro lado, en el primer semestre del año 2020 en el momento de aguas bajas (Fig. 4b), se evidenciaron valores mínimos del nivel del agua demasiado bajos comparados con lo registrado para la década, influenciando claramente en la abundancia fitoplanctónica, que para el caso de Barranquilla-Las Flores ( $\approx 300$  ind/mL). Este momento coincide con la materialización del fenómeno de Cuña Marina (se observa proliferación de diatomeas con  $57,5$  % de predominancia, principalmente las especies de *Navícula* Bory con  $33,7$  %) y en cuanto a Sabanagrande, por la cercanía de la estación de captación de agua con cuerpos cenagosos adyacentes como la Ciénaga Vergara, se beneficia la proliferación de algas por la disminución de niveles del agua de la ciénaga y aumento de la concentración de nutrientes, y por la dinámica del río y sus zonas inundables, se mantienen en estrecha comunicación.

En cuanto al segundo semestre, en el 2019 (Fig. 4c) se evidenció la tendencia natural del fitoplancton con el régimen del río, como fue en el caso del 2020-1: altas densidades de microalgas en el período de aguas bajas, que sus niveles estuvieron similares a los valores mínimos registrados para la década, seguido del momento de aguas en descenso, aguas en ascenso y aguas altas con recuento de células fitoplanctónicas muy bajas y muy similares ( $r: -0,83$  y  $p$ -valor:  $0,04$ ). En ese momento de aguas bajas, a partir del mes de agosto de 2019 por los bajos niveles del río se dio el

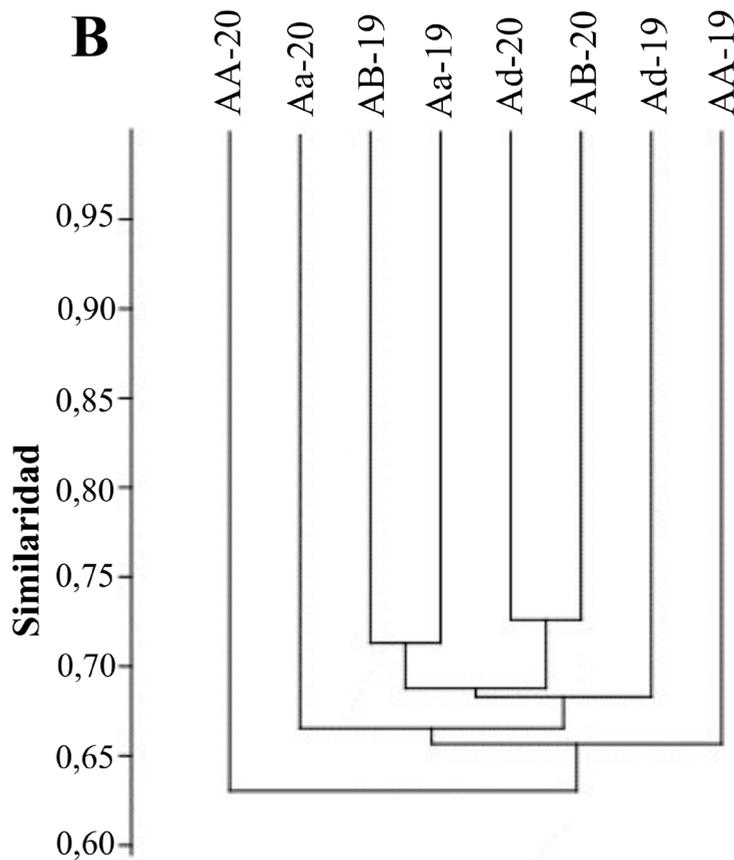
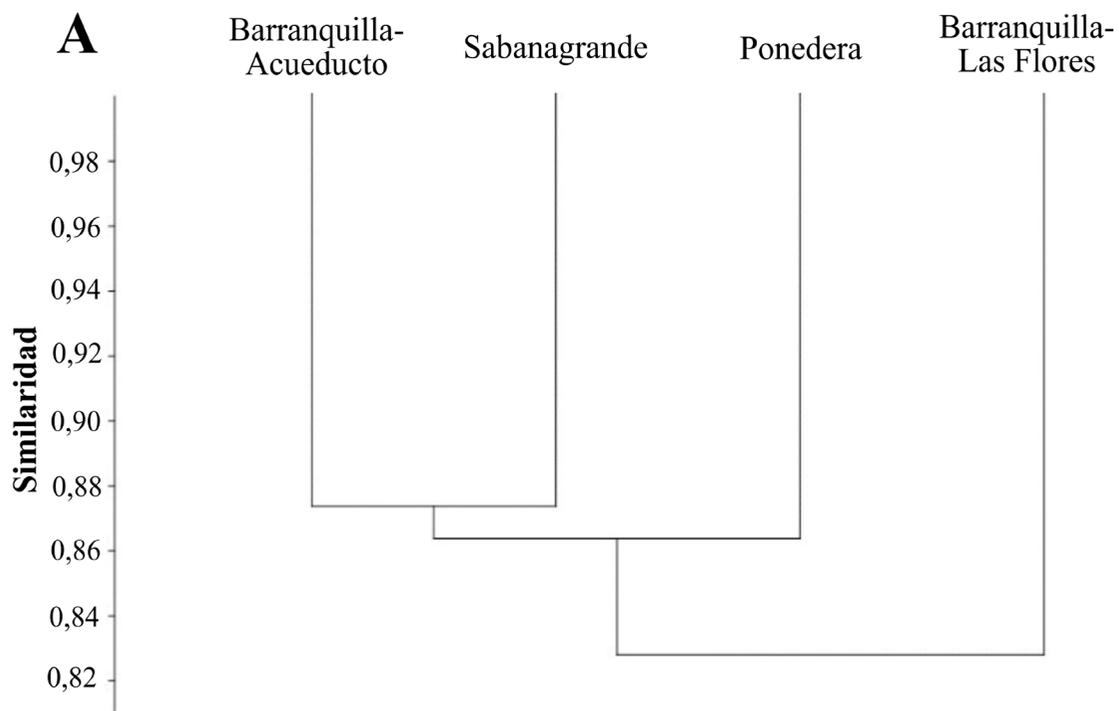
fenómeno de proliferación algal en la ciénaga Vergara que afectó la estación de captación de Sabanagrande, y a su vez, la abundancia relativa del fitoplancton registrada estuvo cercana a los  $400$  ind/mL en promedio (siendo  $82,2$  % especies del género *Oscillatoria* Vaucher ex Gomont,  $7,7$  % *Dolichospermum* sp., principalmente). Difiriendo de la situación en Barranquilla-Puente Pumarejo y Ponedera, donde los recuentos fueron altos, pero hubo una composición diferente (*Oscillatoria* sp.  $34,7$  %, *Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen  $27,5$  %, las especies de *Euglena* Ehrenberg  $13,75$  % en Barranquilla-Puente Pumarejo y diatomeas principalmente *A. granulata*  $33,49$  % en Ponedera) y no se percibió cambio en las características del agua en la captación.

Para el 2020-2 (Fig. 4d), los recuentos de fitoplancton fueron muy bajos, en promedio por debajo de las  $50$  microalgas por mililitro, esto debido a que no hubo una diferenciación en los períodos del régimen hidrológico, regido por los altos niveles del río Magdalena debido a las lluvias influenciadas por el Fenómeno de la Niña que acogió a este segundo semestre del 2020, lo que se corroboró con una baja correlación entre abundancia y régimen y sin significancia estadística ( $r: 0,40$  y  $p$ -valor:  $0,37$ ). Lo cual cambia la morfología del sistema, aguas mucho más turbias y cargadas de sedimentos, poca incidencia de luz solar y menor concentración de nutrientes por la cantidad de agua.

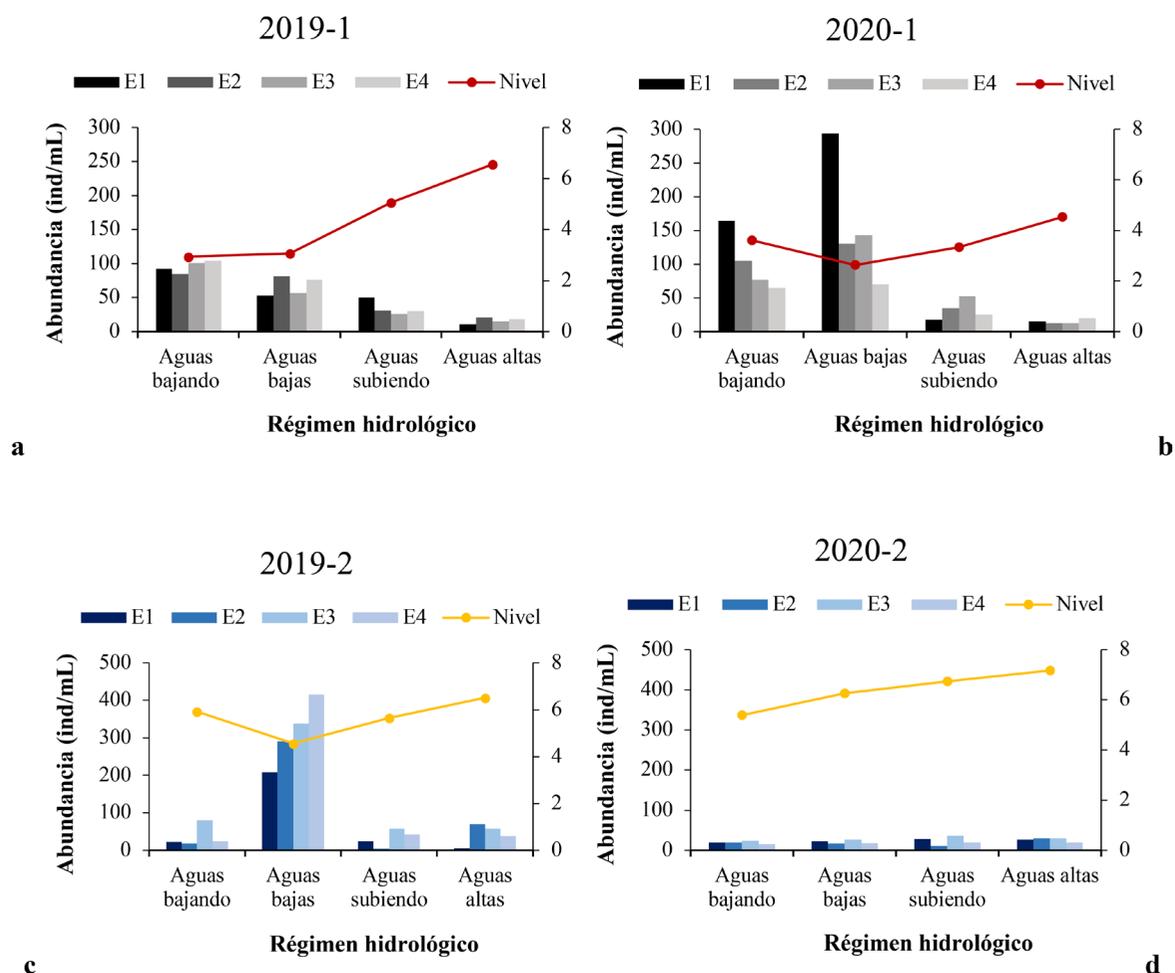
Además de los diferentes momentos del régimen hidrológico del río, la abundancia del fitoplancton se relacionó con las variables fisicoquímicas analizadas (Fig. 5). Los momentos correspondientes a bajos niveles del agua como aguas bajas de 2019-II y 2020-I, asociados a valores altos de nitrógeno total ( $> 1$  mg/L) y bajos valores de sólidos suspendidos totales ( $< 100$  mg/L) correspondieron con un alto número de individuos de microalgas. Por otro lado, los momentos asociados a aguas altas (2019-I, 2020-I y 2020-II) denotó una baja abundancia relativa del fitoplancton con mayor proximidad a valores altos de SST ( $> 200$  mg/L) sin dimensionar los valores altos de nutrientes.

## DISCUSIÓN

El orden decreciente de riqueza morfoespecífica de las divisiones así: Bacillariophyta, Chlorophyta, Cyanobacteria, Euglenozoa y Miozoa, ha sido descrito anteriormente para otros ríos tropicales como el Tehuantepec en México (Moreno-Ruiz *et al.* 2008) y Lurín en Perú (Vélez-Azañero



**Figura 3.** Análisis de similitud de Jaccard con base a la composición de la comunidad de fitoplancton **(a)** en las estaciones de captación y **(b)** los momentos del régimen hidrológico del río Magdalena, en el departamento del Atlántico. Ad: Aguas en descenso, AB: aguas bajas, Aa: aguas en ascenso, AA: aguas altas. E1: Barranquilla – Las Flores, E2: Barranquilla – Acueducto, E3: Sabanagrande, E4: Ponedera.

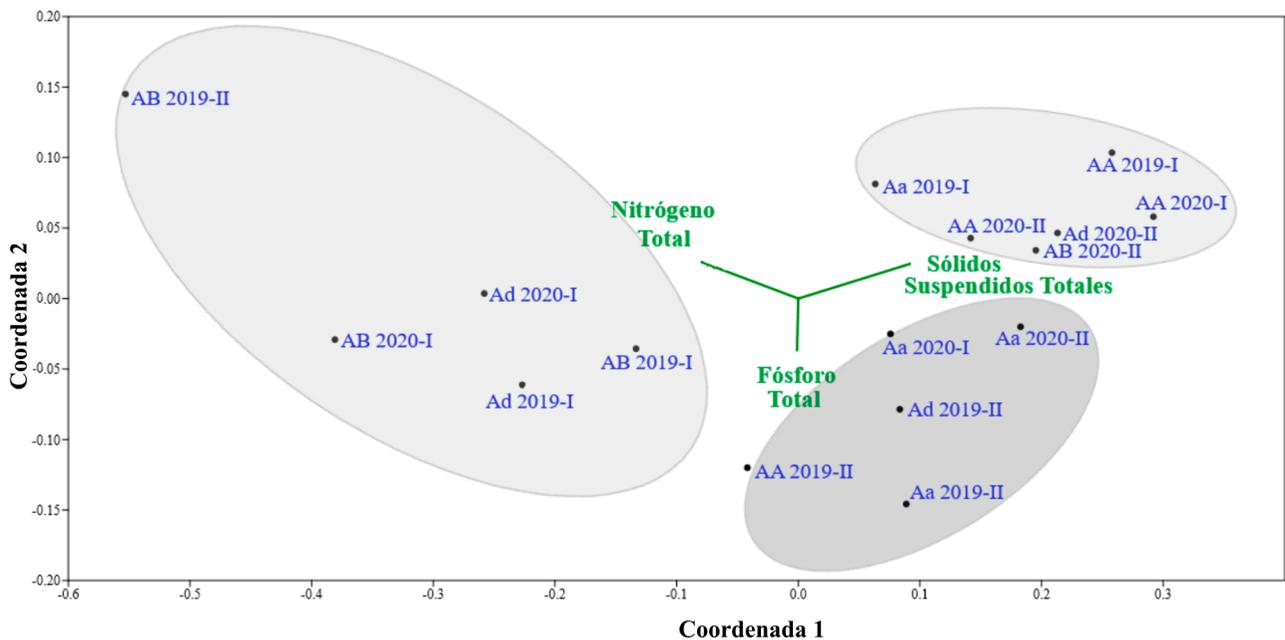


**Figura 4.** Densidad fitoplanctónica reportada en los diferentes momentos del régimen hidrológico del río Magdalena, en (a) primer semestre del 2019, (b) primer semestre del 2020, (c) segundo semestre del 2019 y (d) segundo semestre del 2020. E1: Barranquilla – Las Flores, E2: Barranquilla – Acueducto, E3: Sabanagrande, E4: Ponedera.

*et al.* 2016). Adicionalmente, en múltiples estudios de fitoplancton libre y fitoperifiton en sistemas loticos ha sido registrado el alto porcentaje de riqueza de las Bacillariophyta (Franco *et al.* 2003, Martínez *et al.* 2007, Silva *et al.* 2008, Ribeiro *et al.* 2009); en específico, en el río Cesar que hace parte de la cuenca del Magdalena con un porcentaje de 41 % del total (De la Parra-Guerra *et al.* 2017), contrastado con el 34,8 % registrado en este estudio, lo cual concuerda como uno de los grupos taxonómicos más abundantes en sistemas acuáticos (López y Altamirano 2011), lo que puede estar relacionado con que las diatomeas poseen material silíceo en su pared celular (frústula), característica que les otorga mayor resistencia a cambios fisicoquímicos del medio (Bellinger y Sigeo 2010).

La especie más abundante en términos de densidad fue *Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen, esto relacionado a que las especies de este género presentan un alto

grado de variabilidad morfológica intraespecífica que está asociado con su capacidad de adaptación a muy diversas condiciones hidráulicas, gracias a lo cual pueden encontrarse tanto en ambientes loticos como lenticos (Hernández-Atilano *et al.* 2008), denotando que no solo proliferan en ambientes someros como ciénagas. Además, que fue la especie que predominó en la composición de las comunidades de las cuatro estaciones del estudio, resultados que concuerda con Moreno-Ruiz *et al.* (2008), que describen a *A. granulata* como una especie eurihalina con distribución ligeramente alta, ya que es capaz de vivir aguas arriba (como Sabanagrande y Ponedera) y cerca de la desembocadura de los ríos (Barranquilla-Las Flores) y por otro lado, Bortolini y Bueno (2013) que la definen como una especie de estrategia R, comunes en el plancton fluvial, sin importar bajas concentraciones de nutrientes en el medio.



**Figura 5.** Análisis multidimensional no métrico (NMDs) entre las variables fisicoquímicas y las abundancias del fitoplancton en los distintos momentos del régimen hidrológico del río Magdalena. Ad: Aguas en descenso, AB: aguas bajas, Aa: aguas en ascenso, AA: aguas altas.

La división Euglenozoa aunque presentó baja riqueza de especies, tuvo datos sobresalientes en términos de abundancia, como probable respuesta a considerables cantidades de materia orgánica, derivadas de las actividades urbanas (Moreno-Ruiz *et al.* 2008), principalmente aguas arriba con descargas de aguas residuales tratadas y sin tratar, disposición inapropiada de residuos sólidos al río, entre otras actividades antrópicas amenazantes. Especies que son comunes pertenecientes a los géneros *Euglena* Ehrenberg, *Phacus* Dujardin y *Trachelomonas* Ehrenberg, al igual que *Melosira varians* Agardh, son consideradas como indicadoras de aguas ricas en materia orgánica (De la parra-Guerra *et al.* 2017) y fueron abundantes en las estaciones de muestreo especialmente en los momentos de máximo estiaje del río. En cuanto a *Cymbella affinis* Kützing, *Nitzschia acicularis* (Kützing) Smith y *Pinnularia viridis* (Nitzsch) Ehrenberg son especies características de aguas limpias y con un bajo contenido de materia orgánica (Montoya-Moreno y Aguirre 2009), estas tuvieron bajas abundancias durante los dos años de estudio, apareciendo especialmente cuando el río tiene niveles de agua altos y la última solo se observó en la Barranquilla-Las Flores y Sabanagrande.

En cuanto a los taxones pertenecientes a Chlorophyta, las especies más representativas en términos de abundancia fueron *Scenedesmus* sp., *S. quadricauda* (Turpin) Brébisson, que según Bazán (2010), las especies de éste género son de crecimiento rápido y de alta tasa de renovación, indicativas de un grado de mineralización de la materia orgánica de moderado a alto; y dos especies del género *Pediastrum* Meyen: *P. simplex* Meyen y *P. duplex* Meyen, las cuales forman un componente importante de la comunidad de fitoplancton en aguas dulces eutróficas (Martínez-Goss *et al.* 2016). Por otra parte, *Tetraedron* sp. que reportó muy baja abundancia y que solo se reportó para Barranquilla-Las Flores y Ponedera, está asociado a que prolifera mejor en aguas con condiciones oligotróficas diferente a lo que se reporta para el río Magdalena (Duque y Núñez-Avellaneda 2000, Valderrey 2015), al igual que la cianofita *Chroococcus* sp. que solo se registró en Barranquilla-Las Flores y que ha sido descrita como indicadora de aguas con impureza o contaminación moderada (Moreno-Ruiz 2000, John *et al.* 2002) como es característico de zonas aguas abajo cercano a la desembocadura del río, por el aumento en la concentración de nutrientes y la incidencia de factores ambientales óptimos para que especies oportunistas como esta, puedan formar florecimientos algales (Muciño-Márquez *et al.* 2015).

**Tabla 3.** Fitoplancton presente en las cuatro estaciones de muestreo del río Magdalena en el departamento del Atlántico, en los 22 meses de muestreos. E1: Barranquilla – Las Flores, E2: Barranquilla – Acueducto, E3: Sabanagrande, E4: Ponedera.

Especies	Estaciones de muestreo			
	E1	E2	E3	E4
<b>Clase Bacillariophyceae</b>				
<i>Asterionella formosa</i> Hassall	x	x		x
<i>Fragilaria capucina</i> Desmazières	x	x	x	x
<i>Gomphonema parvulum</i> (Kützing) Kützing		x	x	x
<i>Navicula</i> sp.	x	x	x	x
<i>Navicula tripunctata</i> Bory	x	x	x	x
<i>Nitzschia acicularis</i> (Kützing) Smith	x	x	x	x
<i>Gyrosigma attenuatum</i> (Kützing) Rabenhorst	x	x	x	x
<i>Cymbella affinis</i> Kützing	x	x	x	x
<i>Cymatopleura solea</i> (Brébisson) Smith	x		x	
<i>Diatoma</i> sp.1	x	x	x	x
<i>Diatoma</i> sp.2	x	x	x	x
<i>Pinnularia viridis</i> (Nitzsch) Ehrenberg	x		x	
<i>Ulnaria ulna</i> (Nitzsch) Compère	x	x	x	
<i>Tabellaria</i> sp.		x		
<i>Rhopalodia</i> sp.	x			
<b>Clase Coscinodiscophyceae</b>				
<i>Melosira varians</i> Agardh	x	x	x	x
<i>Coscinodiscus</i> sp.	x	x	x	x
<i>Aulacoseira granulata</i> (Ehrenberg) Simonsen	x	x	x	x
<b>Clase Mediophyceae</b>				
<i>Lindavia comta</i> (Kützing) Nakov <i>et al.</i>	x	x	x	x
<b>Clase Chlorophyceae</b>				
<i>Scenedesmus quadricauda</i> (Turpin) Brébisson	x	x	x	x
<i>Scenedesmus</i> sp.	x	x	x	x
<i>Eudorina elegans</i> Ehrenberg	x	x	x	x
<i>Pandorina</i> sp.	x	x	x	x
<i>Coelastrum microporum</i> Nägeli	x	x	x	
<i>Tetraedron</i> sp.	x			x

(Continúa)

Especies	Estaciones de muestreo			
	E1	E2	E3	E4
<i>Pediastrum simplex</i> Meyen	x	x	x	x
<i>Pediastrum duplex</i> Meyen	x	x	x	x
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i> Dangeard	x	x	x	
<i>Selenastrum</i> sp.		x	x	
<i>Ankistrodesmus</i> sp.			x	
<i>Tetraspora</i> sp.	x	x	x	x
<b>Clase Trebouxiophyceae</b>				
<i>Chlorella vulgaris</i> Beijerinck	x	x	x	x
<i>Actinastrum hantzschii</i> Lagerheim	x	x	x	x
<i>Oocystis</i> sp.	x	x	x	x
<i>Diacanthos</i> sp.			x	
<b>Clase Zygnematophyceae</b>				
<i>Cosmarium botrytis</i> Meneghini ex Ralfs	x	x	x	x
<i>Cosmarium</i> sp.	x	x	x	x
<i>Closterium limneticum</i> Lemmermann	x	x	x	x
<i>Closterium venus</i> Kützing ex Ralfs	x	x	x	x
<i>Staurastrum</i> sp.	x	x	x	x
<i>Staurastrum leptocladum</i> Nordstedt	x	x	x	x
<b>Clase Cyanophyceae</b>				
<i>Oscillatoria tenuis</i> Agardh ex Gomont	x	x	x	x
<i>Oscillatoria</i> sp.	x	x	x	x
<i>Dolichospermum</i> sp.	x	x	x	x
<i>Spirulina</i> sp.	x	x	x	x
<i>Merismopedia elegans</i> Braun ex Kützing		x	x	x
<i>Chroococcus</i> sp.	x			
<i>Microcystis aeruginosa</i> (Kützing) Kützing		x	x	
<i>Plankthotrix</i> sp.	x	x	x	x
<b>Clase Euglenophyceae</b>				
<i>Euglena</i> sp.1	x	x	x	x
<i>Euglena</i> sp.2	x	x	x	x
<i>Euglena</i> sp.3	x	x	x	x

(Continúa)

Especies	Estaciones de muestreo			
	E1	E2	E3	E4
<i>Phacus longicauda</i> (Ehrenberg) Dujardin	×	×	×	×
<i>Phacus</i> sp.	×	×	×	×
<i>Strombomonas</i> sp.	×	×	×	×
<i>Trachelomonas similis</i> Stokes	×	×	×	×
<i>Trachelomonas armata</i> (Ehrenberg) Stein	×	×	×	×
<b>Clase Dinophyceae</b>				
<i>Peridinium volzii</i> Lemmermann			×	

Nuestros resultados arrojaron que Sabanagrande y Ponedera tienen una composición en la comunidad de fitoplancton más similar, que con respecto a las dos estaciones de Barranquilla, sin embargo, difieren en la riqueza morfoespecífica registrada; esto pudo estar asociado a la mayor cantidad de sólidos suspendidos totales que se encuentran en la columna de agua de la estación en Ponedera, debido a procesos erosivos que aportan sedimentos, que se relaciona con la presencia de aguas turbias (Blanco-Muñoz *et al.* 2020) ya que reduce la disponibilidad de luz que es crítica en la dinámica del fitoplancton, lo que puede impactar no solo la riqueza de especies, sino también la abundancia y biomasa (Dokulil 1994, Sew y Todd 2020). El caso contrario se registró en las dos estaciones de Barranquilla, donde presentaron misma riqueza morfoespecífica pero con diferencias en la composición fitoplanctónica, resultado que puede estar asociado a la cercanía de la estación en Las Flores con la desembocadura en el mar Caribe, factor que regula la mezcla entre el agua continental y el agua oceánica; la cual, puede ser la respuesta a la variabilidad en las condiciones fisicoquímicas de estas estaciones, provocando variaciones en la diversidad (recambio de las especies) y estructura de las comunidades biológicas (Blanco-Muñoz *et al.* 2020).

Las extensas sequías y la eutrofización en los cuerpos de agua del Atlántico, incluyendo el río Magdalena en su paso por el departamento, permiten la proliferación de microalgas, principalmente por el aumento de concentraciones de nutrientes, variando la predominancia de los géneros según el lugar y sus condiciones, como ocurre con Barranquilla-Las Flores que proliferan diatomeas (*Navícula* Bory y *Aulacoseira* Thwaites) diferente a Sabanagrande

que proliferan cianofitas como *Oscillatoria* Vaucher ex Gomont y *Dolichospermum* (Ralfs ex Bornet y Flahault) Wacklin *et al.*, las cuales afectan la calidad de las aguas y repercuten en la biota acuática presente.

El fitoplancton resulta ser una valiosa herramienta de seguimiento de los ecosistemas acuáticos, con la oportunidad de ser utilizados como bioindicadores como se ha registrado por diversos autores, dado que, por sus cortos ciclos de vida y su alta sensibilidad a los cambios físicos, químicos y ambientales del agua, permite conocer el estado de un ecosistema cuando otros tipos de indicadores ni siquiera se han alterado o desviado de su comportamiento. Se logró observar una relación entre las variables analizadas y las microalgas: cuando el fósforo total predominó por encima del nitrógeno total, se presentó proliferación de cianofitas que incorporan nitrógeno del sistema, y un alto contenido de sólidos suspendidos totales representa una alta turbiedad en el agua que causa la disminución en el paso de los rayos solares y afecta el intercambio gaseoso, situaciones claves en la ecología del fitoplancton (Roldán y Ramírez 2008).

En conclusión, el monitoreo y la investigación en el campo de los ecosistemas acuáticos brindan conocimiento relevante para su manejo y conservación. Se recomienda aunar esfuerzos en generar políticas con un enfoque ecosistémico en la cuenca del Magdalena, en búsqueda de conocer la dinámica y conexión de los cuerpos cenagosos y caños con el río en su cuenca baja e incentivar a mejorar las prácticas y actividades antrópicas que son perjudiciales para el recurso hídrico, generando cambios en la calidad del agua y a su vez, conduciendo a la transformación y pérdida de la biodiversidad. De igual forma, se considera necesario

la implementación del fitoplancton como base de indicadores de calidad ecológica de los humedales del departamento, que permita obtener información de los impactos antrópicos a los que se ven sometidos.

## PARTICIPACIÓN DE AUTORES

RARL, diseño metodológico, análisis de datos, escritura del documento; DPC, análisis de datos, escritura del documento y adquisición de financiación.

## AGRADECIMIENTOS

A la Sociedad de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Barranquilla Triple A S.A. E.S.P. por el espacio y los recursos para la realización de esta investigación. A los estudiantes y egresados del programa de Biología de la Universidad del Atlántico por sus aportes al conocimiento e investigación al área de Aseguramiento de Calidad del Agua.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

## LITERATURA CITADA

Albert JS, Destouni G, Duke-Sylvester SM, Magurran AE, Oberdorff T, Reis RE, Winemiller KO, Ripple WJ. 2021. Scientists' warning to humanity on the freshwater biodiversity crisis. *Ambio*. 50(1):85–94. doi: <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01318-8>

Alcaldía de Barranquilla. 2019. El gran Malecón del río. [Revisada en: 4 de octubre de 2023]. <https://www.barranquilla.gov.co/descubre/conoce-a-barranquilla/sitios-de-interes/gran-malecon>

Angulo C. 1954. El departamento del Atlántico y sus condiciones físicas. *So. Geo. Col.* 12(1):1–23.

APHA. 2017. Standard methods for the examination of water and wastewater. En: Baird RB, Eaton AD, Rice EW, Brigewater LL, editores. Washington DC, Estados Unidos: American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) and Water Environment Federation. Water Environment Federation. p. 522–527

Bazán GI. 2010. Estudios ficológicos en el sistema léntico de La Arocena (Departamento Maracó), La Pampa, Argentina. [Tesis]. [Argentina]: Universidad Nacional del Río Cuarto (UNRC).

Bellinger EG, Sigee DC. 2010. *Freshwater Algae: Identification and Use as Bioindicators*. Chichester, Inglaterra: Wiley. doi: <https://doi.org/10.1002/9780470689554>

Blanco-Muñoz E, De la Parra-Guerra AC, García-Alzate C, Villareal-Blanco E. 2020. Análisis físico-químico y fitoplanctónico de la ciénaga Puerto Caimán, vertiente Caribe, Colombia. *Intropica* 15(2):114–125. doi: <https://doi.org/10.21676/23897864.3650>

Bortolini JC, Bueno NC. 2013. Seasonal variation of the phytoplankton community structure in the São João River, Iguazu National Park, Brazil. *Braz. J. Biol.* 73(1):1–14. doi: <https://doi.org/10.1590/s1519-69842013000100002>

Castellanos K, Pizarro J, Cuentas K, Costa JC, Pino Z, Gutiérrez LC, Franco OL, Arboleda JW. 2017. Lentic water quality characterization using macroinvertebrates as bioindicators: An adapted BMWP index. *Ecol. Indic.* 72:53–66. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.07.023>

Castellanos K, Gutiérrez LC. 2009. Evaluación de la calidad del agua en sistemas lénticos mediante el uso de macroinvertebrados como bioindicadores. [Tesis]. [Cartagena]: Universidad de Cartagena.

De la parra-Guerra A, García-Alzate C, Rodelo-Soto K, Gutiérrez-Moreno L. 2017. Fitoperifiton Composition and Structure of the Middle and Lower Basin of the River Cesar, Cesar Department-Colombia. *Rev. MVZ Córdoba*. 22(2):5938–5950. doi: <https://doi.org/10.21897/rmvz.1029>

Dokulil MT. 1994. Environmental control of phytoplankton productivity in turbulent turbid systems. *Hydrobiologia* 289(1–3):65–72. doi: <https://doi.org/10.1007/BF00007409>

Dudgeon D. 2019. Multiple threats imperil freshwater biodiversity in the Anthropocene. *Curr. Biol.* 29(19):960–967. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.08.002>

Duque SR, Núñez-Avellaneda MN. 2000. Microalgas acuáticas de la Amazonía colombiana. *Bio. Col.* 1(2):208–216.

Franco J, Sulca L, Cáceres C. 2003. Fitoplancton del río altoandino “Kaño” - Tacna (Cordillera suroccidental del Perú). *Ciencia y Desarrollo*. 7:49–55. doi: <https://doi.org/10.33326/26176033.2003.7.131>

García-Alzate C, Gutiérrez LC, De la Parra A. 2016. Embalse de El Guájaro: Diagnóstico ambiental y estrategias de rehabilitación. En: Alvarado M, editor. *Sur del Atlántico*. Barranquilla, Colombia: Fundación Promigas. p. 155–157.

Grill G, Lehner B, Thieme M, Geenen B, Tickner D, Antonelli F, Babu S, Borrelli P, Cheng L, Crochetiere H, Ehalt H, Filgueiras R, Goichot M, Higgins J, Hogan Z, Lip B, McClain ME, Meng J, Mulligan M, Nilsson C, Olden JD, Opperman JJ, Petry P, Reidy C, Sáenz L, Salinas-Rodríguez S, Schelle P, Schmitt RJP, Snider J, Tan F, Tickner K, Valdujo PH, van Soestbergen A, Zarfl C. 2019. Mapping the world's free-flowing rivers. *Nature* 569(7755):215–221. doi: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1111-9>

- Gutiérrez-Moreno LC, De la Parra-Guerra A. 2020. Contaminación en la cuenca del río Magdalena (Colombia) y su relación con los peces. En: Jiménez-Segura L, Lasso C, editores. XIX. Peces de la cuenca del río Magdalena, Colombia: diversidad, conservación y uso sostenible. Bogotá, Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. p. 239-263. doi: <https://10.21068/A2020RRHHXIX>
- Guzmán A. 2005. Aspectos históricos y técnicos del río Magdalena. Una visión sobre experiencias en el río. *Hojas Universitarias*. 57:35-44.
- Hemraj DA, Hossain MA, Ye Q, Qin JG, Leterme SC. 2017. Plankton bioindicators of environmental conditions in coastal lagoons. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 184:102-114. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.10.045>
- Hernández-Atilano E, Aguirre NJ, Palacio JA, Ramírez-Restrepo JJ. 2008. Variación espacio-temporal de la asociación fitoplanctónica en diferentes momentos del pulso hidrológico en la Ciénaga de Ayapel (Córdoba), Colombia. *Actu. Biol.* 30(88):67-81. doi: <https://doi.org/10.17533/udea.acbi.329332>
- Hernández AE, Sepúlveda SR, Grajales VH, Aguirre RN, Vélez MF, Caicedo Q, Mesa VJA, Cortés F, Montoya M Y. 2018. Ecological quality index using periphytic algae in San Juan river (Antioquia-Colombia). *Rev. MVZ Cordoba*. 23:6998-7012. doi: <https://doi.org/10.21897/RMVZ.1423>
- Hernández E, Agudelo DM, Flórez E, Sepúlveda R, Zabala AM, Vargas L, Parra M, Ramírez G, Aguirre N, Vélez, F. 2020. Índice de Calidad Ecológica y gestión hídrica en tres ecosistemas de Colombia. *Rev. Biol. Trop.* 68(4): 1337-1345. doi: <https://doi.org/10.15517/rbt.v68i4.41522>
- [IPBES] The Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. 2019. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. *Pop. Dev. Rev.* 45(3):680-681. doi: <https://doi.org/10.1111/padr.12283>
- Jiménez L. c2019a. Zona del embalse El Guájaró fue sometida a descontaminación. [Revisada en: 10 de abril de 2023]. <https://www.elheraldo.co/atlantico/zona-del-embalse-el-guajaro-fue-sometida-descontaminacion-681712>
- Jiménez L. c2019b. Embalse El Guájaró presentó florecimiento de algas, fenómeno natural: CRA. *El Heraldó* (edición en línea). [Revisada en: 10 de abril de 2023]. <https://www.elheraldo.co/barranquilla/embalse-el-guajaro-presento-florecimiento-de-algas-fenomeno-natural-cra-610564>
- Jiménez-Pérez PE. 2019. Evaluación de la Calidad del agua de la quebrada Tolda Fría (Villamaría, Caldas) a través del Índice de Calidad Ecológica (ICE) con algas perifíticas. [Tesis]. [Manizales]: Universidad Nacional de Colombia.
- John DM, Whitton BA, Brook AJ. 2002. *The Freshwater Algal Flora of the British Isles*. UK, Cambridge: University Press.
- López FO, Altamirano MC. 2011. Diatomeas bentónicas de los oasis de Baja California Sur. [Informe Final SNIBCONABIO]. [La Paz, México D.F]: Universidad Autónoma de Baja California Sur.
- Martínez AL, Luque ME, Lombardo D, Bruno E. 2007. Potamoplancton en la cuenca media del río Cuarto (Córdoba, Argentina). *Limnetica* 26(1):25-38. doi: <https://doi.org/10.23818/limn.26.03>
- Martínez-Goss M, Arguelles E, Nacorda J. 2016. Some *Pediatrum* species (Chlorophyceae) from Laguna de Bay (Philippines) and its vicinities. *Philipp. Sci.* 53:31-51.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. 2018. Guía para el Ordenamiento del Recurso Hídrico Continental Superficial. Bogotá: Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico.
- Montoya-Moreno Y, Aguirre N. 2009. Asociación de algas perifíticas en raíces de macrófitas en una ciénaga tropical colombiana. *Hidrobiológica*. 18(3):189-198.
- Moreno JR, Medina CD, Albarracín VH. 2012. Aspectos ecológicos y metodológicos del muestreo, identificación y cuantificación de cianobacterias y microalgas eucariotas. *Reduca (Biología)* 5:110-125.
- Moreno-Ruiz JL. 2000. Fitoplancton. En: De la Lanza G, Hernández S, Carbajal JL, editores. Organismos indicadores de la calidad del agua y de la contaminación (bioindicadores). México: Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal. p. 43-108.
- Moreno-Ruiz JL, Tapia-García M, González-Macias MDC, Figueroa-Torres MG. 2008. Fitoplancton del río Tehuantepec, Oaxaca, México y algunas relaciones biogeográficas. *Rev. Biol. Trop.* 56(1):27-54. doi: <https://doi.org/10.15517/rbt.v56i1.5507>
- Muciño-Márquez RE, Figueroa-Torres MG, Aguirre-León A. 2015. Cianofitas de los sistemas fluvio-lagunares Pom-Atasta y Palizada del Este, adyacentes a la Laguna de Términos, Campeche, México. *Polibotánica* 39(20):49-78. doi: <https://doi.org/10.18387/polibotanica.39.3>
- Olarte A, González D. 2018. Determinación del tratamiento y la calidad de agua utilizando macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores. *Rev. Din. Amb.* 2(2):9-26.
- Oliva-Martínez MG, Godínez-Ortega JL, Zuñiga-Ramos CA. 2014. Biodiversidad del fitoplancton de aguas continentales en México. *Rev. Mex. Biodivers.* 85:54-61. doi: <https://doi.org/10.7550/rmb.32706>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). 2015. Management of cyanobacteria in drinking-water supplies. [Revisada en: 28 feb 2023]. <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-FWC-WSH-15.03>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). 2018. Guías para la calidad del agua de consumo humano. Organización Mundial de La Salud, 4(1) 608. [Revisada en: 15 oct 2021]. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/272403/9789243549958-spa.pdf?ua=1>

- Restrepo JD. 2015. El impacto de la deforestación en la erosión de la cuenca del río Magdalena. *Rev. Acad. Colomb. Ci. Exac.* 39(151):250-267. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.141>
- Restrepo JD, Cárdenas-Rozo A, Paniagua-Arroyave JF, Jiménez-Segura L. 2020. Aspectos físicos de la cuenca del río Magdalena, Colombia: geología, hidrología, sedimentos, conectividad, ecosistemas acuáticos e implicaciones para la biota. En: Jiménez-Segura L, Lasso CA, editores. XIX. Peces de la cuenca del río Magdalena, Colombia: diversidad, conservación y uso sostenible. Bogotá, Colombia: Serie Editorial Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros Continentales de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. doi: <https://doi.org/10.21068/B2020RRHHXIX01>
- Ribeiro MD, Alves NF, Moreno da Silva MA, Santos R. 2009. Composição e distribuição do microfitoplâncton do rio Guamá no trecho entre Belém e São Miguel do Guamá, Pará, Brasil. *Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Cienc. Nat.* 4(3):341-351. doi: <https://doi.org/10.46357/bcnaturais.v4i3.654>
- Rivera CA, Zapata AM, Pérez D, Morales Y, Ovalle H, Álvarez JP. 2010. Caracterización limnológica de humedales de la planicie de inundación del río Orinoco (Orinoquía, Colombia). *Acta Biol. Colomb.* 15(1):145-166.
- Roldán G, Ramírez J. 2008. Fundamentos de limnología neotropical. Antioquia: Editorial Universidad de Antioquia.
- Sarmiento ML, Ruiz E. 2017. Microalgas como indicadores biológicos del estado trófico de las ciénagas de Malambo y Santo Tomás, en el departamento del Atlántico. [Tesis]. [Bogotá]: Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Saita TM, Natti PL, Cirilo ER, Romeiro NML, Candezano MAC, Acuña RB, Moreno LCG. 2018. Simulação numérica da dinâmica de coliformes fecais no lago Luruaco, Colômbia. *TEMA (São Carlos)*. 18(3):435. doi: <https://doi.org/10.5540/tema.2017.018.03.435>
- Sew G, Todd P. 2020. Effects of Salinity and Suspended Solids on Tropical Phytoplankton Mesocosm Communities. *Tropical Con. Sci.* 13. doi: <https://doi.org/10.1177/1940082920939760>
- Silva AM, Sili C, Torzillo G. 2008. Cyanoprocaryota y microalgas (Chlorophyceae y Bacillariophyceae) bentónicas dominantes en ríos de Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.* 56:221-235.
- Valderrey J. 2015. *Chroococcusturgidus* (kutzing) *nageli*. [Revisada en: 15 oct 2021]. <http://www.asturnatura.com/especie/chroococcus-turgidus.html>. ISSN 1887-5068
- Van Vuuren SJ, Taylor J, van Ginkel C, Gerber A. 2006. Easy identification of the most common freshwater algae. Potchefstroom, Sudáfrica: North-West University and Department of Water Affairs and Forestry.
- Vélez-Azañero A, Lozano S, Cáceres-Torres K. 2016. Diversidad de fitoplancton como indicador de calidad de agua en la cuenca baja del río Lurín, Lima, Perú. *Ecología Aplicada*. 15(2):69-79. doi: <https://doi.org/10.21704/rea.v15i2.745>
- Winder M, Sommer U. 2012. Phytoplankton response to a changing climate. *Hydrobiologia* 698:5-16. doi: <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1149-2>